师生互动中组块化反馈促进长时学习迁移：行为和近红外超扫描研究

朱怡[1*] 胡谊[2*]

([1] 宁波大学心理学系暨研究所, 宁波 315211) ([2] 华东师范大学心理与认知科学学院，上海 200062)

摘要 精细内容反馈促进深层次的学习，如迁移。但在师生互动中反馈的呈现方式如何影响长时学习迁移及其人际神经基础尚不清楚。本研究采用面对面的师生问答反馈任务，通过两个双人实验（行为学、近红外超扫描），探究反馈的组块化呈现对学习迁移的长时促进作用、认知过程及其人际神经基础。结果发现，组块化反馈促进低知识基础学生的长时迁移。组块化错误修正在反馈呈现方式和长时迁移之间起中介作用。提供与接收组块化反馈过程中，师、生在额、顶叶出现更大的脑间同步，且额叶的脑间同步预测长时迁移与组块化错误修正。上述结果从人际视角为课堂中真实发生的教学反馈的认知神经基础提供新的理解，也为提高教学反馈效果和效率提供一些实践启示。

关键词 反馈，组块化，长时迁移，师生互动，近红外超扫描，脑间同步

收稿日期：2023-09-04
基金资助：教育部人文社会科学研究青年项目（23YJC190043）；浙江省省属高校基本科研业务费专项资金（SJWZ2024016）；宁波大学教研项目（JYXM2024037）
通讯作者：朱怡, 胡谊 E-mail: zhuyi@nbu.edu.cn; yhu@psy.ecnu.edu.cn

1 引言

教学离不开师生互动，它是发生在教师和学生之间的交互作用和相互影响（Watanabe, 2013）。教学反馈是真实课堂中师生互动的一种典型方式，常由教师向学生提供关于当前表现与目标之间差距的信息，它能有效推动学生的态度与行为发展、知识与技能习得（Hattie & Timperley, 2007）。知识习得可以表现为对知识的再认和迁移，后者是建立在前者基础之上的一种更深层次的学习，涉及在一种情境中获得的知识和理解在另一情境中的运用；学习迁移常作为教学目标在教学活动中广泛存在，与学生新情境问题解决能力密切相关（Prenzel & Mandl, 1993）。已有研究表明，精细内容反馈能促进学习迁移，比如在提供正确答案的基础上额外附加原因解释或举例说明，可以加深学习者对知识的理解并促进知识在新情境中的运用（Butler et al., 2013; Finn et al., 2018; Zhu et al., 2022）。那么，在真实的师生互动中，若不改变反馈的内容，而是改变反馈的呈现方式，比如按关联进行组块化（Chunking），会如何影响学习迁移呢？除了即时的学习增益，组块化的反馈能否带来迁移的长时增益呢？教学反馈是一个双向过程，涉及教师与学生通过连续互动进行知识的动态传递，为揭示上述动态、连续、双向的教学过程中涉及的认知神经过程，研究有必要超越静态的学习材料、间断的学习过程以及基于单人的无或伪互动范式，从人际视角切入对互动双方的大脑信号进行同时的采集与分析（Tan et al., 2023）。

1.1 反馈呈现方式对学习的影响

前人研究指出，保持信息内容不变，仅改变信息的呈现方式也会影响信息加工。例如，将记忆材料按组块化呈现可以促进短时和长时记忆（Gobet et al., 2001）。组块是一种元素的集合，一个组块内的元素彼此之间存在较强的关联，但与其他组块内的元素关联较弱（Chase & Simon, 1973）。在教与学领域，通过强调学习内容之间的关联可以帮助学习者在结构不良领域获得高级知识并促进新情境问题的解决（Spiro et al., 1991），将复杂的动作序列按组块化呈现可以改变学习者的回忆策略并促进迁移（Cohen & Sekuler, 2010），将反馈信息按积极或消极分组呈现时，会影响内隐知觉类别学习（Smith et al., 2014）。

值得注意的是，将反馈信息按组块化呈现时，很可能同时导致反馈时间点的改变，带来反馈延迟（Smith et al., 2014）。前人有关反馈时机影响学习的研究并未得到完全一致的结果。一部分研究者认为及时反馈能更有效地避免错误被编码进记忆中，进而提高语言、程序性知识和动作技能的学习（Anderson et al., 2001）。而另一部分研究者则支持延时反馈可以减少前

摄干扰，从而更有利于遗忘早先的错误并加工后续纠正性的信息（Kulhavy & Anderson, 1972）。后续研究发现，延时反馈对学习的促进作用在长时间间隔（如 7 天后）的测验上才得以表现，包括再认、回忆和迁移（Butler et al., 2007; Mullet et al., 2014; Smith & Kimball, 2010）。

1.2 反馈促进学习的认知神经基础

关于反馈促进学习的可能认知机制，主要包括以下两种。第一，根据认知主义学习理论，研究者认为反馈的主要作用是修正错误，且具体、有针对性或信息丰富的反馈不仅能修正知识性错误，也可以帮助调整学习策略的使用错误（Kulhavy & Stock, 1989; Narciss & Huth, 2004; Bangert-Drowns et al., 1991）。第二，根据元认知主义学习理论，研究者认为反馈通过有效地标识学生当前水平与目标之间的差距，促使学生自主地投入更多的认知努力去缩小差距，进而提升学习表现（Nicol & McFarlane-Dick, 2006; Sadler, 1989）。当反馈提供的信息对当前表现与目标之间的差距标识地越是具体、临近或具有适当的挑战水平，更能激发学习投入与认知努力（Song & Keller, 2001; Krijgsman et al., 2019）。

前人研究发现反馈接收者在加工反馈信息时，大脑的额、顶区域活动增加，主要包括前扣带回皮质（anterior cingulate cortex, ACC）、背外侧前额叶皮质（dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC）以及顶叶。ACC 主要负责反馈的基础功能，如错误检测和期望违反（Cavanagh et al., 2012; Luft et al., 2013; Mars et al., 2005），而 DLPFC 和顶上小叶参与更为复杂的反馈加工过程，如错误修正和表现调整（Crone et al., 2008; van Duijvenvoorde et al., 2008; Zanolie et al., 2008）。研究还发现，额、顶区域的活动可以预测基于反馈的学习表现，包括配对联想记忆（Arbel et al., 2013）、动作学习效率（van der Helden et al., 2010）以及阅读和数学表现（Peters et al., 2017）等。反馈加工除了激活信息接收者的大脑，也激活信息提供者的大脑。例如，当老师提供正误判断反馈并监控学生（假被试）的联想学习表现时，老师的 ACC 活动与学生的错误预期相关，老师的脑岛和腹内侧前额叶的活动与学生的价值预期相关（Apps et al., 2015）。因此，为了深入了解教学反馈的呈现方式影响学习的认知神经过程，同时探究真实师生互动过程中双方的大脑活动显得尤为必要，但目前这方面的研究尚显不足。

1.3 师生互动教学的人际神经基础

近年来，有关社会互动神经机制的研究视角从第三人称转向了第二人称。这类研究遵循的底层逻辑认为，以第二人称真实参与的社会互动所涉及的神经活动，本质上不同于个体从第三人称视角观察社会性刺激引发的神经反应（Schilbach et al., 2013）。基于多脑同时扫描

技术（即，超扫描 Hyperscanning）对两个或多个个体在任务过程中的大脑活动进行同时记录，为揭示真实社会互动的神经基础提供了可能（Redcay & Schilbach, 2019）。研究表明，脑间同步（brain-to-brain synchrony）支持成功的人际交流，很可能是社会互动的人际神经基础（Hasson et al., 2012; Jiang et al., 2012）。虽然脑间同步的认知意义仍存在一定争议，但研究较为一致地指出脑间同步是互动参与者在行为、情绪和认知层面达成一致的关键机制，涉及行为对齐、情绪共情、社会遵从、语言理解和人际联结等，反映复杂社会互动中的动态认知神经机制（Kelsen et al., 2022; Shamay-Tsoory et al., 2019; Tan et al., 2023）。

教学作为社会互动的一种方式，通常涉及师、生基于互动传递并接收动态连续的信息。单脑指标一般反映单个主体对信息的加工过程，对揭示师生互动教学的神经基础的效力有限（Tan et al., 2023），而结合超扫描技术的研究揭示师生脑间同步指示有效的教与学（Bevilacqua et al., 2019; Holper et al., 2013; Nguyen et al., 2022）。由于功能磁共振的时间分辨率和扫描空间对任务类型的限制，目前较少应用于真实教学互动研究进行同时的数据采集。脑电和近红外成像（functional near-infrared spectroscopy, fNIRS）更容易实现在师生互动过程中对双方的大脑活动进行同时采集；相比于脑电，fNIRS 的空间分辨率更高且对动作伪迹的容忍度更大（Lloyd-Fox et al., 2010），所以更适用于研究真实情境中的教学。基于 fNIRS 超扫描技术的研究发现，师生互动教学时额叶或颞顶区域的脑间同步可以指示有效的教学策略，如支架式和高频互动式（Pan et al., 2018, 2020; Zheng et al., 2018），并预测学生的学习表现，如声乐演唱（Pan et al., 2018）、数学表现（Liu et al., 2019; Zheng et al., 2018）和概念性知识的再认与迁移（Pan et al., 2020; Zhu et al., 2022）等。在基于精细内容反馈的师生互动教学时，顶叶的师生脑间同步反映学生对概念性知识的深层次理解并预测学生的知识迁移（Zhu et al., 2022）。此外，师生脑间同步还可以提供学生知识理解的进程性信息，如达成理解的时间点和师生时间差模式等（Liu et al., 2019; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022），进而增加对真实课堂教学动态连续性的理解。但前人研究大多关注脑间同步与即时学习增益之间的关联，鲜有考察脑间同步是否对长时的学习表现仍有预测作用。

1.4 当前研究

本研究采用一项基于师生问答反馈的概念教学任务（Zhu et al., 2022），依次开展两个实验。实验 1 为双人行为学实验，旨在考察反馈的内容不变，仅通过改变呈现方式（组块化），能否进一步促进深层学习（迁移）及其长时促进作用，并探究其认知过程。依据前人反馈信息组块化和学习材料组块化研究，将组块化反馈设定为同时呈现两个关联性概念的答案和举

例（Simith et al., 2014; Cohen & Sekuler, 2010; Gobet et al., 2001; Spiro et al., 1991）。因为 fNIRS 的空间分辨率更高、且对动作伪迹的容忍度更大（Lloyd-Fox et al., 2010），更适用于研究动态连续的多人教学活动，所以在实验 2 增加 fNIRS 超扫描技术同时采集教师与学生的大脑活动，旨在进一步探查师生互动中反馈的组块化呈现影响学生长时学习迁移的神经基础。

在实验 1 中，学生学习心理学概念，并从教师处接收组块（两个有关联的概念）或单独（一个概念）的精细内容反馈（正确答案和举例）。考虑到原有的知识经验背景是影响知识理解及迁移的重要影响因素之一（Gick & Holyoak, 1987），以及接受反馈前学生先验知识水平会影响反馈的有效性（Fyfe et al., 2012; Krause et al., 2009），所以通过设置学习导入阶段来操纵学生接收反馈前的知识基础，以此考察知识基础的可能影响。实验 1 采用完全被试间设计，反馈呈现（组块 vs. 单独）× 知识基础（高 vs. 低）。在学习结束后，从知识的再认和迁移两个维度测量学生的学习表现，并要求学生报告认知努力。为了进一步探究组块化反馈的长时增益，参照前人研究设置了 7 天后的第二次知识测试（Butler et al., 2007; Smith & Kimball, 2010）。此外，用学习前、后测试中对应题目由错误转变为正确的组数量化组块化错误修正。实验 1 的假设如下：（1）新手或基础较差的学生更可能受益于旨在提供更多支持的反馈（Paas et al., 2003; Sweller et al., 1998），而更有经验或知识基础较好的学生对于更多支持的反馈信息依赖更小（Renkl & Atkinson, 2003; Sweller et al., 1998）；精细内容反馈可以促进知识迁移（Butler et al., 2013; Finn et al., 2018; Zhu et al., 2022）；将学习内容按组块化呈现相比于单独呈现可以为概念辨别提供更多支持与机会（Spiro et al., 1991; Chase & Simon, 1973），所以预期当学生知识基础较低时，按组块化呈现的精细内容反馈，能更有效地支持学习并表现为促进知识迁移；（2）由于组块化的信息有利于长时记忆（Gobet et al., 2001），且因组块化呈现而导致的反馈延迟也更可能带来学习的延迟-保持效应（Kulhavy & Anderson, 1972），所以预期组块化反馈也能促进长时的学习表现，特别是 7 天后的知识迁移；（3）基于反馈促进学习的可能认知机制（Bangert-Drowns et al., 1991; Nicol & McFarlane-Dick, 2006），预期反馈呈现方式通过组块化错误修正或认知努力影响长时的知识迁移。

在实验 2 中，增加 fNIRS 超扫描技术同时记录教师与学生在互动过程中的大脑活动。此外，为了排除反馈呈现方式与反馈时间点之间可能存在的混淆，新增假组块（两个关联较小的概念）反馈组。实验 2 的假设如下：（1）相比于非组块反馈（包括假组块和单独反馈），组块化反馈更有利于学生的长时迁移表现；（2）反馈呈现方式通过组块化错误修正或认知努力影响长时知识迁移；（3）人类加工反馈信息激活接收者和提供者的额、顶脑区（Apps et al., 2015；Crone et al., 2008；Luft et al., 2013）、加工组块信息依赖 DLPFC 和后顶叶皮层（Alamia

et al., 2016; Bor et al., 2003; Jin et al., 2020; Pammi et al., 2012）；真实的教学互动引发双方在额叶和颞顶区域的同步性脑活动（Tan et al., 2023; Zhu et al., 2022），所以预期在师生互动中组块化反馈引发更大的师-生脑间同步，且出现在与反馈加工和组块加工均有关的额、顶区域；（4）由于组块化语言信息的加工更依赖于额叶（Jin et al., 2020; Grodzinsky & Santi, 2008）且额叶的活动与长时的记忆或学习表现有关（Sakai & Passingham, 2003; Squire et al., 1993）；师生额叶的脑间同步可以指示有效的教学策略（Pan et al., 2018; 2020），而组块化呈现教学内容是一种更有效的教学策略（Spiro et al., 1991; Cohen & Sekuler, 2010），故而预期组块反馈过程中额叶上的师生脑间同步与学生的长时迁移表现正相关；（5）由于社会互动引发的脑间同步反映互动双方在认知上的对齐（Shamay-Tsoory et al., 2019）且出现在支持相互理解的心智化网络，包括额叶（Kelsen et al., 2022），而错误修正可以反映学生的理解向教师的理解靠拢并达成一致，所以预期额叶上的脑间同步可能与组块化错误修正正相关。

2 实验 1：双人行为学实验

2.1 被试

参考既往师生互动研究，每个条件安排 20~24 组师生，效应量达 0.20~0.25（Liu et al., 2019; Pan et al., 2020; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）。使用 G*Power 3.1 进行功效分析（Effect size = 0.20, $\alpha = 0.05$, $1 - \beta = 0.95$）得到的计划样本量为 81。实验 1 共招募 127 名华东师范大学在校学生：47 名为教师角色，要求专业是心理学或社会学且至少学完一门教师教育类课程或有教学经历（年龄 $M = 21.80$，$SD = 2.12$，18 名男性）；80 名为学生角色，要求专业为非心理学和社会学（年龄 $M = 20.67$，$SD = 1.96$，12 名为男性），且在知识前测时匹配概念与例子的正确率不及格（＜0.6）。将 12 名教师（6 名男性）、10 名教师（6 名男性）、13 名教师（3 名男性）、11 名教师（3 名男性）随机分入高知识-组块反馈、高知识-单独反馈、低知识-组块反馈和低知识-单独反馈组。在同一天，老师按同一种方式与随机分配的 1 名或 2 名陌生学生依次开展一对一教学。对教师而言，知识基础和反馈呈现也是被试间变量，以此避免心理学专业的教师被试猜测出实验意图，并提高教学的一致性。据此，共组成 80 组师-生，其中高知识-组块反馈 20 组，高知识-单独反馈 19 组，低知识-组块反馈 21 组，低知识-单独反馈组 20 组。所有被试均为视力或矫正视力正常, 无神经系统疾病。实验开始前，每一名被试阅读并自愿签署了纸质版知情同意书。本研究通过了本校人体实验伦理委员会的审核。

2.2 实验材料与评定

事先招募了另一组心理学专业被试（$N = 20$，4 名男性，年龄 $M = 24.45$，$SD = 2.89$），这组被试需要对提供的 12 个有关判断与决策的心理学概念（详见附录 1，来源于 Rawson et al., 2015）根据他们之间存在的关联，进行两两配对。结果发现有 20 人将登门槛效应与门面效应配对，16 人将易得性启发与代表性启发配对，15 人将基本归因错误和自我服务偏差配对，14 人将后视偏差与反事实思维配对，14 人将去个体化和社会促进配对，9 人将观察者效应和曝光效应配对。由此可见，将前 5 组配对的人数≥70%，将第 6 组配对的人数仅占 45%。后续，他们还评价了前 5 组心理学概念之间的关联性程度（用 1~7 表示两个概念的关联度从极低到极高）。经韦克斯勒秩和检验，前 4 组的关联度评分均显著大于中等水平（$Ms > 4.80$, $ps < 0.026$）；但第 5 组，即去个体化和社会促进的关联度评分（$M = 4.00$, $SD = 1.00$）与中等水平（即，4）不存在显著差异（$p = 0.839$）。综合考虑，我们选定前 5 组概念作为实验材料，后续按上述配对情况进行概念组块化。

用于教学的材料包含概念术语、定义和两个举例（详见附录 1）。举例是概念在现实生活中的具体表现或应用，均改编自前人研究和教科书（Finn et al., 2018; Rawson et al., 2015; Zimbardo et al., 2012）。事先招募的这组心理学被试还评定了每个概念术语的两个举例在具体的情境、场景上的相似性。评定使用 7 点评分，用 1~7 表示两个例子的相似性从极低到极高。这组被试对这 10 个概念的评分 $M = 4.28$，$SD = 0.88$，范围从 2.85~5.5。经韦克斯勒秩和检验，评分与中等水平（即，4）没有显著差异（$p = 0.447$）。用肯德尔 W 系数计算这组被试的评分者一致性系数，数值为 0.43（$p < 0.001$），说明这组被试在评分上具有显著的一致性。之后，由实验者事先选定分别用于反馈和迁移测量的例子，且对于所有被试固定不变。

2.3 实验流程

实验任务分两次进行，间隔约 4 天（图 1）。第一次任务在实验室或通过会议软件线上进行，第二次任务在实验室进行。在第一次任务时，教师被试进行教学内容和流程的标准化培训（约 30 分钟）。结束后，教师被试将纸质版教学材料带走继续学习并背诵概念对应的定义和举例。第二次任务开始前，实验者会要求教师被试回忆教学流程并随机抽查两个术语的定义和举例，在他们正确作答后，方可开始正式的教学任务。

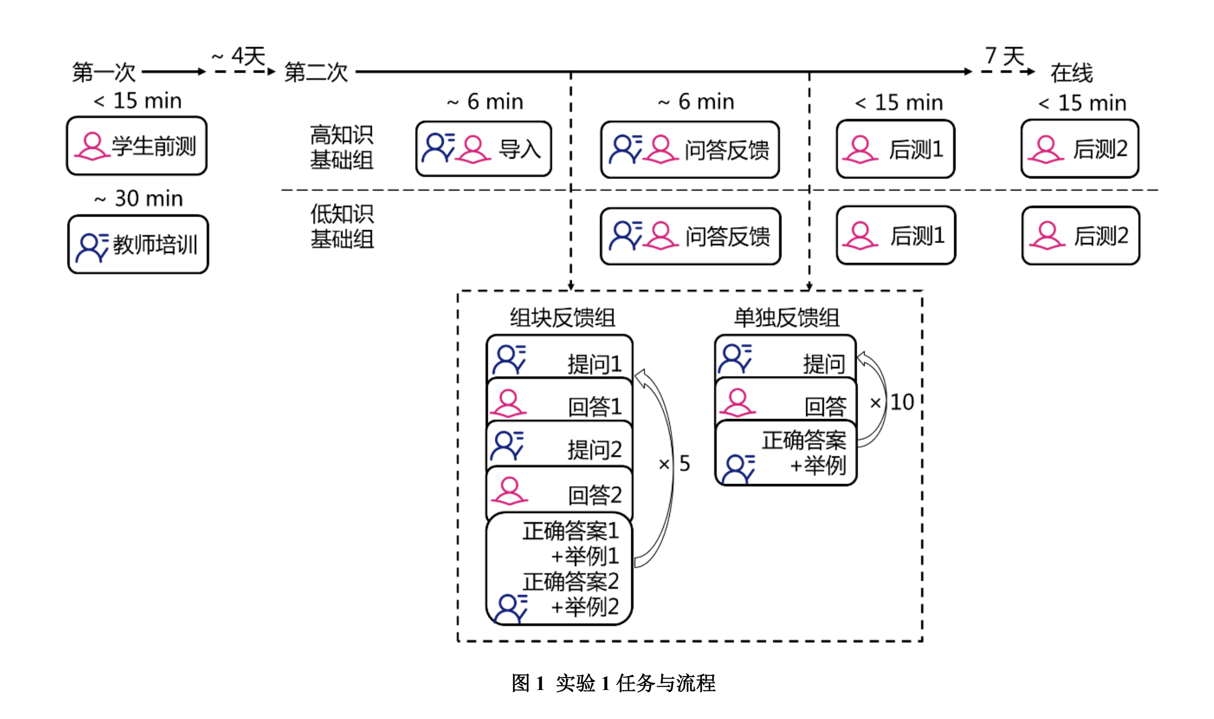


图 1 实验 1 任务与流程

在第一次任务时，学生被试需要完成一个学习前测验（限时 15 分钟），用于测量他们关于这一组 10 个心理学概念的先验知识基础。该测验包含两部分，第一部分需要为 10 个定义匹配对应的术语；第二部分需要为 10 个例子匹配对应的术语（提供了 12 个有关判断和决策的术语备选项，详见附录 1，测验设置参考 Finn et al., 2018）。知识基础由学习前测验的正确率进行量化。在学习前测验时，学生们的正确率在反馈呈现上（组块 vs. 单独，第一部分，0.55 ± 0.20 vs. 0.57 ± 0.19, $F(1, 56) = 0.20$, $p = 0.659$；第二部分，0.23 ± 0.13 vs. 0.27 ± 0.15, $F(1, 56) = 0.85$, $p = 0.361$）没有显著差异；在知识基础上没有显著差异（高 vs. 低，第一部分，0.52 ± 0.17 vs. 0.60 ± 0.21, $F(1, 56) = 2.09$, $p = 0.154$；第二部分，0.27 ± 0.14 vs. 0.24 ± 0.14, $F(1, 56) = 0.66$, $p = 0.420$）；上述两因素也无交互效应（第一部分，$F(1, 56) = 1.08$, $p = 0.304$；第二部分，$F(1, 56) = 1.27$, $p = 0.264$）。

在第二次任务时，老师和学生间隔约一米面对面坐着。对于高知识基础组，任务设置导入和问答反馈两个阶段。对于低知识基础组，仅设置问答反馈阶段。在导入阶段，老师把 10 个概念的术语和定义连续给学生讲述两遍，讲述顺序由老师提前制定，但要求同组概念不连续呈现。在问答反馈阶段，单独反馈组共 10 个试次，每个试次包含 3 个环节，即老师提问（先说出一个概念的定义，向学生提问对应的术语是什么）、学生回答、老师反馈（提供正确的术语和定义，并附加一个举例）。概念的提问顺序也由老师提前制定，但要求不同于导入阶段（若存在的话）的顺序，且同组概念不能连续呈现。组块反馈组共 5 个试次，每个试次包含 5 个环节，即老师提问 1、学生回答 1，老师提问 2，学生回答 2，老师反馈 1 和 2，

1 和 2 为事先配对的两个概念。组块反馈组的一个试次举例如下：

老师：请问定义“当某一事件已经发生，人们倾向于高估自己预见结果的能力。”对应的心理学术语是什么？

学生：后视偏差。

老师：好的，我们先来看下一个问题。请问“定义当某一事件发生后，人们倾向于想象与实际相反的、可能发生但最终没有发生的结果。”对应的心理学术语是什么？

学生：反事实思维。

老师：这一组术语分别是后视偏差和反事实思维。后视偏差的定义是“当某一事件已经发生，人们倾向于高估自己预见结果的能力。”举个例子，有些同学会在老师公布正确答案之后，拍着大腿说，“我就知道是选这个！”而反事实思维的定义是“当某一事件发生后，人们倾向于想象与实际相反的、可能发生但最终没有发生的结果。”举个例子，在奥运比赛刚刚结束，运动员领奖牌时，银牌得主往往不及铜牌得主来得快乐。银牌得主在接受采访时，他们有时候会说：“我差点就能赢了，这太糟糕了。”

实验全程由一台数码摄像机（HDR-XR100, Sony Corporation, Tokyo, Japan）记录。

在问答反馈阶段结束后，学生被试填写一项认知负荷评价量表（Hart, 2006, 见附录 2），包括脑力、体力、时间、努力、业绩和受挫六个维度。之后，学生被试完成学习后测验（限时 15 min），用于测量知识再认和迁移。在知识再认的测量中，学生被试需要为提供的 10 个定义匹配其对应的术语；在知识迁移的测量中，学生被试需要为提供的 10 个新例子匹配其对应的术语（测验设置参考 Finn et al.，2018）。学习后测验与学习前测验的内容一致。参考前人研究在测量长时学习效果时，常会设置 7 天的时间间隔（如，Butler et al., 2007; Smith & Kimball, 2010），本实验中的学生被试在 7 天后被要求通过会议软件在线完成第二次学习后测验（限时 15 min），内容与之前一致，以此考察反馈呈现方式对学习的长时效应。

2.4 数据分析

因为每一位老师随机配对了 1~2 名学生，存在学生嵌套在老师和小组中的情况，所以下述计算如无特殊说明，均基于 R 软件包 *lme4* 做线性混合模型。若需多重比较校正，使用 FDR 方法（Benjamini & Hochberg, 1995）。

数据分析的思路和方法如下：（1）确证导入阶段的有或无对学生接收反馈前知识基础高或低的操纵有效；（2）确证基于反馈的师生互动（无论呈现方式和知识基础）均能增加学生的概念性知识并长时保持；（3）探究学生的知识基础和反馈的呈现方式对学习概念性知识增

加的长时影响；（4）探究与（3）有关的认知过程，如促进错误修正、增加认知努力等，另基于 R 软件包 *mediation* 做中介分析。

2.5 结果

2.5.1 接收反馈前学生知识基础的操纵检验

在问答反馈阶段的学生回答环节中，学生完整说出正确术语记 2 分，说出术语的关键词记 1 分，其他情况记 0 分，总分为 20 分，用回答的正确率量化反馈前学生的知识基础并建立线性混合模型，它的固定效应是反馈呈现（组块 vs. 单独）和知识基础（高 vs. 低），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。结果发现，知识基础的效应显著（$F(1, 54.98) = 194.27, p < 0.001$）：相比于知识基础低组（$M = 0.10, SD = 0.09$），知识基础高组的正确率显著更高（$M = 0.60, SD = 0.19$）。反馈呈现的效应不显著（$F(1, 54.19) = 2.45, p = 0.123$）。交互效应不显著（$F(1, 54.41) = 2.28, p = 0.137$）。这表明，导入阶段的有或无对学生接收反馈前知识基础高或低的操纵有效。

2.5.2 基于反馈的师生互动促进了知识再认和迁移，且能长时保持

就学生在再认/迁移测验上的正确率分别建立线性混合模型，它的固定效应是测验时间（学习前 vs. 学习后即时 vs. 学习后 7 天）、反馈呈现（组块 vs. 单独）和知识基础（高 vs. 低），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。并将迁移/再认测验上的正确率分别放入模型以控制其可能存在的效应。这一步中，主要关注测验时间的效应。

结果发现，再认的测验时间效应显著（$F(2, 133.94) = 22.17, p < 0.001$，图 2a）：相比于学习前正确率（$M = 0.56, SD = 0.20$），学习后即时正确率（$M = 0.95, SD = 0.12, t(156) = 6.35$, corrected $p < 0.001, \beta = 0.22, SE = 0.03$）和学习后 7 天正确率（$M = 0.88, SD = 0.15, t(151) = 5.57$, corrected $p < 0.001, \beta = 0.18, SE = 0.04$）都显著提高；经历 7 天，正确率衰退不显著（$t(114) = 1.65$, corrected $p = 0.31, \beta = 0.04, SE = 0.02$）。迁移的测验时间效应显著（$F(2, 119.44) = 15.15, p < 0.001$，图 2b）：相比于学习前正确率（$M = 0.25, SD = 0.14$），学习后即时正确率（$M = 0.74, SD = 0.25, t(141) = 5.19$, corrected $p < 0.001, \beta = 0.24, SE = 0.05$）和学习后 7 天正确率（$M = 0.66, SD = 0.26, t(135)= 4.89$, corrected $p < 0.001, \beta = 0.21, SE = 0.04$）都显著提高；经历 7 天，正确率衰退不显著（$t(107) = 1.29$, corrected $p = 0.198, \beta = 0.04, SE = 0.03$）。

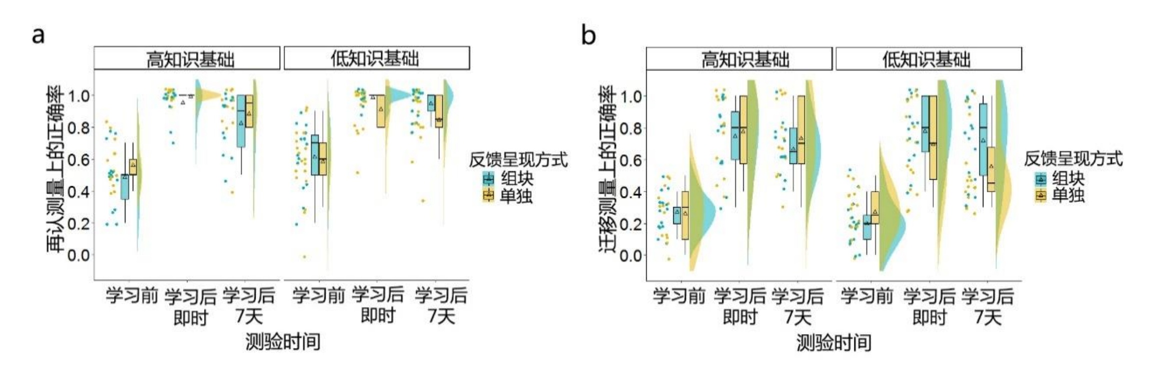


图 2 概念性知识水平

此外，在再认上，反馈呈现的主效应不显著（$F(1, 54.76) = 0.02, p = 0.890$），知识基础的主效应显著（$F(1, 55.51) = 5.52, p = 0.022$），所有两因素的交互效应不显著（$Fs < 1.14, ps > 0.292$），三因素交互效应不显著（$F(2, 106.69) = 0.96, p = 0.385$）。在迁移上，反馈呈现的主效应不显著（$F(1, 61.04) = 0.01, p = 0.910$），知识基础的主效应不显著（$F(1, 60.90) = 2.49, p = 0.120$），所有两因素的交互效应不显著（$Fs < 0.14, ps > 0.711$），三因素的交互效应边缘显著（$F(2, 100.38) = 2.68, p = 0.074$）。

2.5.3 相比于单独呈现，组块化呈现的反馈更有利于低知识基础学生的长时迁移

为了控制个体在知识基础上的差异，并进一步探查反馈呈现方式和知识基础在不同测试时间上对学习的不同影响，后续分析均就学习后概念性知识的增加（相对于前测的正确率增量）建立线性混合模型。就即时的再认正确率增量（学习后即时-学习前）建立线性混合模型，固定效应是知识基础（高 vs. 低）和反馈呈现（组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。并将即时的迁移正确率增量一起放入模型以控制其可能存在的效应。结果发现，即时再认增量的反馈呈现效应不显著（$F(1, 41.49) = 0.07, p = 0.797$）、知识基础效应不显著（$F(1, 41.23) = 1.20, p = 0.279$）且交互效应不显著（$F(1, 40.70) = 0.06, p = 0.804$）。此外，就即时的迁移正确率增量建立线性混合模型，其他设置同前，放入即时的再认正确率增量以控制其可能存在的效应。结果发现，即时迁移增量的反馈呈现效应不显著（$F(1, 39.84) = 1.55, p = 0.220$）、知识基础效应不显著（$F(1, 40.66) = 0.07, p = 0.786$）且交互效应不显著（$F(1, 39.79) = 0.81, p = 0.372$）。

就 7 天后的再认、迁移的正确率增量（学习后 7 天-学习前）建立与前述设置相同的线性混合模型。结果发现，7 天后再认增量的反馈呈现效应不显著（$F(1, 39.32) = 0.05, p = 0.827$）、知识基础效应不显著（$F(1, 40.82) = 0.02, p = 0.890$）且交互效应不显著（$F(1, 40.53) = 0.01, p = 0.904$, 图 3a）。7 天后迁移增量的反馈呈现效应不显著（$F(1, 73) = 1.26, p = 0.266$）、知识

基础效应不显著（$F(1, 73) = 0.94, p = 0.335$），但是交互效应显著（$F(1, 73) = 4.79, p = 0.032$, 图 3b）。简单效应分析发现，对于低基础学生，接收组块相比于单独反馈，7 天后迁移增量显著更大（0.49 ± 0.25 vs. 0.31 ± 0.24, $t(34.90) = 2.17, p = 0.037, \beta = 0.15, SE = 0.07$）；但对于高基础学生，两种反馈无显著差异（0.43 ± 0.21 vs. 0.49 ± 0.21, $t(37.60) = -0.73, p = 0.469, \beta = -0.05, SE = 0.07$）。在单独反馈组，高基础相比于低基础的学生在 7 天后迁移增量上边缘显著更大（0.49 ± 0.21 vs. 0.31 ± 0.24, $t(33.50) = 1.99, p = 0.054, \beta = 0.15, SE = 0.07$）；在组块反馈组，两类学生无显著差异（0.43 ± 0.21 vs. 0.49 ± 0.25, $t(42.20) = -0.82, p = 0.417, \beta = -0.06, SE = 0.07$）。

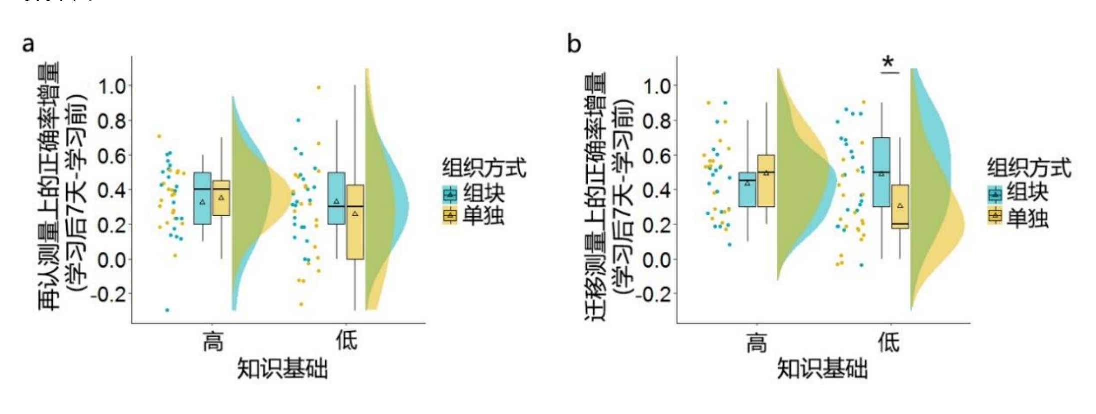


图 3 长时学习增益

2.5.4 反馈的呈现方式通过组块化错误修正影响低知识基础学生的长时迁移

进一步，探究反馈的呈现方式影响低知识基础学生的长时迁移表现的可能认知过程，依次考察组块化错误修正和认知努力。首先，对于每一名学生而言，用学习前均错误→学习后均正确的概念组数量化组块化错误修正。为了更严谨地验证假设，将另外三种组块化保持/转变，即学习前均错误→学习后均错误、学习前均正确→学习后均正确、学习前均正确→学习后均错误的概念组数，也纳入后续分析之中。相比于学习前，学习后 7 天学生在迁移上的保持/转变的概念组数，建立线性混合模型，固定效应是保持/转变（错误→正确 vs 错误→错误 vs 正确→正确 vs. 正确→错误）和反馈呈现（组块 vs. 单独）。随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别；并将学习前测量 2 上的正确或错误的概念组数作为初始水平、学习后 7 天再认测量上保持/转变的概念组数一起放入模型以控制他们可能存在的效应。结果发现，保持/转变效应不显著（$F(3, 166) = 0.77, p = 0.513$），反馈呈现效应不显著（$F(1, 166) = 0.07, p = 0.791$），保持/转变和反馈呈现交互效应显著（$F(3, 166) = 3.59, p = 0.015$）。简单效应分析发现，接收组块相比于单独反馈的学生，错误→正确的概念组数更多（1.62 ± 2.49 vs. 0.95 ± 1.05, $t(133) = 2.47, p = 0.015, \beta = 0.61, SE = 0.25$），错误→错误的概

念组数更少（0.69 ± 0.88 vs. 1.14 ± 1.08, t(127) = -2.01, p = 0.047, β = -0.46, SE = 0.23）。此外，接收组块反馈的学生，错误→正确的概念组数（1.62 ± 2.49）比错误→错误的概念组数更多（0.69 ± 0.88, t(129) = 2.92, corrected p = 0.025, β = 0.69, SE = 0.24），其他两两比较的结果差异均不显著（ts < 2.13, corrected ps > 0.210）。

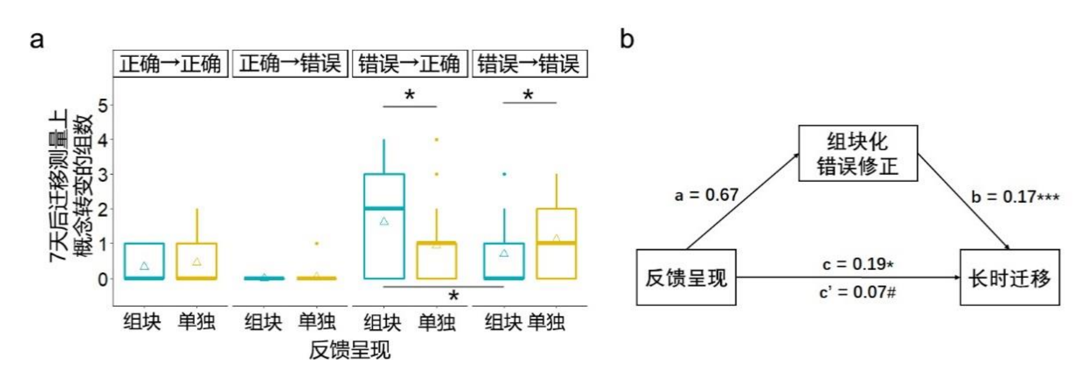


图 4 反馈呈现通过组块化错误修正影响低知识基础学生的长时迁移

此外，7 天后迁移的学习增量与组块化错误修正呈正相关（r = 0.89, R^2 =79.21%, p < 0.001）、与组块化错误保持呈负相关（r = 0.69, R^2 = 47.61%, p < 0.001）。继而考察 7 天后迁移测量上的组块化错误修正、保持在反馈呈现和 7 天后迁移的学习增量之间的中介作用，组块反馈组和单独反馈组被编码为 1 和 0。结果发现，组块化错误修正的中介效应边缘显著，ab = 0.12, bootstrap 95% CI = [-0.02, 0.24], p = 0.072; c' = 0.07, p = 0.063（图 4b）；组块化错误保持的中介效应不显著，ab = 0.07, bootstrap 95% CI = [-0.03, 0.18], p = 0.184; c' = 0.12, p = 0.050。

接下来，就认知努力建立线性混合模型，固定效应是反馈呈现（组块 vs. 单独）。随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。结果发现，反馈呈现的效应不显著（11.52 ± 3.10 vs. 12.70 ± 5.35, F(1, 18.54) = 0.86, p = 0.366）。此外，认知努力与 7 天后迁移学习增量的相关不显著（r = -0.13, R^2 = 1.69%, p = 0.434）。故未继续分析认知努力的中介作用。

2.6 讨论

实验 1 的结果表明，师生互动中组块化反馈可以为先验知识较少的学生带来迁移的长时增益。具体来说，相较于单独呈现，组块化呈现的反馈并未使学生在即时的概念性知识再认和迁移上表现出差异；但在 7 天后，组块化反馈在学生知识迁移上才表现出更大的增益，且这种效应仅发生在接收反馈前知识基础较低的学生身上。其次，实验 1 发现了组块化错误修正在反馈呈现方式和长时迁移表现之间的中介作用边缘显著，但未发现认知努力的作用。

这提示组块反馈对低知识基础学生的长时迁移增益可能是由于更有组织的错误修正得以长时保持，但仍有待后续实验进行更多验证。

在实验 1 中，仍存在一些问题值得注意。首先，在学习后即时测验和 7 天后的测验中，题目的顺序未做改变。这可能导致长时学习表现受学生对答案的简单记忆干扰，而不足以反映知识迁移的长时保持。第二，将反馈进行组块化后，同时导致了反馈时间点的改变。在呈现组块化反馈时，信息内容在被组块化的同时也被延迟了反馈发生的时间点。但单独反馈是信息内容没有被组块化的及时反馈。所以实验 1 中的两种实验条件，除了存在反馈信息是否组块化的差异外，还在反馈的时间点上也存在差别。前人研究发现，延时反馈对学习的促进作用，更可能出现在长时间间隔（如 7 天后）的学习表现上，包括长时迁移（Mullet et al., 2014）。因此，实验 1 的结果无法排除组块化反馈的长时迁移增益来自于纯粹的反馈延迟。为了更好地排除上述两点干扰，在实验 2 中对测题顺序做了随机打乱，并且引入第三个实验条件——即假组块（两个关联较小的概念）反馈，即信息内容没有被组块化的延迟反馈。实验 2 将通过三个水平的比较，在考察实验 1 的结果能否重复的基础上，尝试排除“纯粹反馈延迟”的可能解释。此外，在实验 2 中还增加师生大脑数据的同时采集，进一步探究师生互动中反馈的呈现方式对学生长时迁移的影响及其人际神经基础。

3 实验 2：双人近红外超扫描实验

3.1 被试

参考既往师生互动近红外超扫描研究并使用 G*Power 3.1 进行功效分析（同实验 1），得到的计划样本量为 68。实验 2 共招募 108 名华东师范大学在校学生：40 名为教师角色，要求专业是心理学或社会学且至少学完一门教师教育类课程或有过教学经历（年龄 $M = 22.75$, $SD = 2.34$, 13 名男性）；68 名为学生角色，要求专业为非心理学和社会学（年龄 $M = 21.22$, $SD = 2.45$, 17 名男性）。将 15 名教师（4 名男性）、13 名教师（5 名男性）、12 名教师（4 名男性）随机分入组块反馈、假组块反馈和单独反馈组。教师按同一种方式与随机分配的 1 至 3 名陌生学生分别开展一对一教学，且同一天内仅安排一次实验。据此，共组成 68 组师-生，组块反馈 23 组，单独反馈 23 组，假组块反馈 22 组。所有参与者均为视力或矫正视力正常，无神经系统疾病。实验开始前，每一名被试阅读并自愿签署了纸质版知情同意书。本研究通过了本校人体实验伦理委员会的伦理审核。

3.2 实验材料

在学习后即时测验和 7 天后的测验中，对题目的顺序进行了打乱处理，以减少由固定的题目顺序带来的记忆影响，其他同实验 1。

3.3 实验流程

实验任务分两次进行，间隔约 5 天（图 5）。在第一次任务时，被试的活动同实验 1。学生被试在学习前测验的正确率不存在反馈呈现的组间差异（组块 vs. 假组块 vs. 单独，第一部分, 0.49 ± 0.15 vs. 0.52 ± 0.20 vs. 0.44 ± 0.17, $F(2, 65) = 1.18$, $p = 0.314$; 第二部分, 0.23 ± 0.12 vs. 0.25 ± 0.14 vs. 0.26 ± 0.12, $F(2, 65) = 0.32$, $p = 0.731$）。

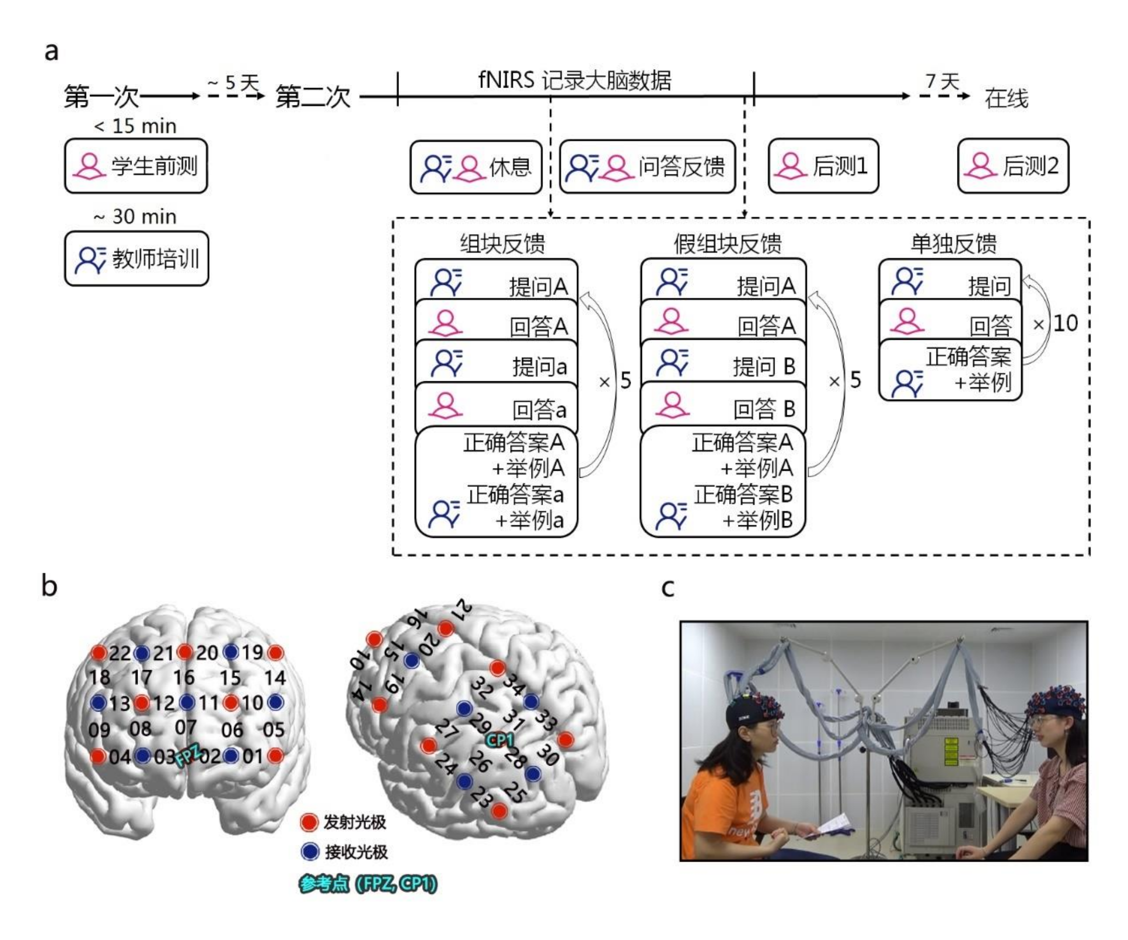


图 5 实验 2 任务与流程、光极点位置与实验场景示意

第二次任务分两部分，即 fNIRS 超扫描和扫描后。在 fNIRS 超扫描部分，老师和学生被试间隔约一米面对面坐着，并佩戴 fNIRS 设备。这部分又分两阶段，即休息和问答反馈。为控制学生在接收反馈时的知识基础较低，实验 2 中一律未设置导入阶段。在休息阶段（300s），被试需闭上眼睛、放空大脑并尽可能保持头和身体不要有大幅度移动。在问答反馈阶段，对于单独反馈组和组块反馈组，流程同实验 1。而在假组块反馈组的每个试次中，安排 5 个环节，包括老师提问 A，学生回答 A，老师提问 B，学生回答 B，老师反馈 A 和

B，且 A 和 B 这两个概念不属于同一个组。10 个概念的提问顺序由老师提前制定，且同组概念不能在顺序上连续呈现。fNIRS 超扫描部分全程由一台数码摄像机（HDR-XR100, Sony Corporation, Tokyo, Japan）记录。在 fNIRS 超扫描结束后，任务同实验 1。

3.4 fNIRS 数据采集和预处理

在超扫描部分，被试的大脑活动用 fNIRS 同时记录（ETG-7100, Hitachi Medical Corporation, Japan）。根据前人研究（Alamia et al., 2016; Bor et al., 2003; Crone et al., 2008; Jin et al., 2020; Luft, 2014; Moore et al, 2006; Olesen et al., 2004; Pammi et al., 2012; van Duijvenvoorde et al., 2008; Zhu et al., 2022），选定额、顶区域为本实验的感兴趣脑区。使用两片光极板覆盖感兴趣脑区：一片 3×5 覆盖在额叶（8 个发射光极和 7 个接收光极，构成 22 个通道，编号 1~22）和另一片 3×3 覆盖在左侧顶叶（5 个发射光极和 5 个接收光极，构成 12 个通道，编号 23~34），具体位置见图 5b。fNIRS 通道对应的脑区位置由 3D 虚拟定位系统确定（Singh et al., 2005）。仅关注左侧顶叶是因为左半球相对于右半球具有语言功能的偏侧性（Vigneau et al., 2006），而概念性知识学习又与语言功能密切相关。

fNIRS 记录的光学信号的波长为 695 和 830 nm，采样率为 10 Hz。数据预处理基于 MATLAB（R2018a, MathWorks, Natick, MA, U.S.A）函数和 Homer2 工具包（v2.2, Huppert et al., 2009）。首先，将原始的光强信号转化为光密度信号（optical density, OD），若通道的 OD 信号过强或过弱（超过 5 个标准差）会被剔除。然后，检查 OD 信号并使用逐通道基于小波的方法对运动伪迹进行校正，选择 Daubechies 5 小波并设置调整参数为 0.1（Cooper et al., 2012; Molavi & Dumont, 2012）。随后对 OD 信号进行 0.01~1Hz 的带通滤波，以去除低频漂移和高频噪音。然后，基于修正的朗伯比尔定律，将 OD 信号转换成氧合血红蛋白（Oxyhemoglobin, HbO）和脱氧血红蛋白浓度变化（Cope & Delpy, 1988）。在这项实验中，我们主要关注 HbO 浓度变化，因为它能反映大脑活动时血流量的变化、具有较高的信噪比（Hoshi, 2007）且被更广泛地用于基于 fNIRS 超扫描的社会互动研究中（Cheng et al., 2015; Jiang et al., 2015; Yang et al., 2020）。

3.5 数据分析

3.5.1 行为学数据分析

因为每一位老师随机配对了 1~3 名学生，存在学生嵌套在老师和小组中的情况，所以下述计算如无特殊说明，均基于 R 软件包 *lme4* 做线性混合模型。若需多重比较校正，使用 FDR

方法（Benjamini & Hochberg, 1995）。

数据分析的思路和方法如下：（1）确证基于反馈的师生问答（无论呈现方式）能增加学生的概念性知识并长时保持；（2）探究反馈呈现方式对概念性知识增加的长时影响；（3）探究与（2）有关的认知过程，如促进错误修正或增加认知努力等；另基于 R 软件包 *mediation* 做中介分析。

3.5.2 fNIRS 数据分析

小波变换相干性（wavelet transform coherence, WTC） 教师和学生的脑间同步由 WTC 算法进行计算，得到两个时间序列基于频率和时间的相关值（Grinsted et al., 2004）。提取来自同一大脑位置（通道）的经过预处理的 HbO 时间序列，比如两列信号（i 和 j）分别提取自教师和学生的 15 通道，然后按如下公式进行 WTC 的计算：

$$\mathrm{WTC}(t,s) = \frac{|\langle s^{-1}W^{ij}(t,s)\rangle|^2}{|\langle s^{-1}W^{i}(t,s)\rangle|^2 |\langle s^{-1}W^{j}(t,s)\rangle|^2}$$

其中 t 表示时间点，s 表示小波尺度，<·>表示在时间和尺度上的平滑处理，以及 W 表示连续的小波变换。然后可以得到一个二维的（时间×频率）WTC 矩阵。本研究只包含对应通道的 WTC 分析。

本研究关注与反馈相关的师-生脑间同步，所以基于实验视频，对反馈开始和反馈结束的时间点进行了标记，然后按 6s 的延迟-峰值效应进行调整（Cui et al., 2009; Jiang et al., 2015）。

基于簇的置换检验（Cluster-Permutation test） 对于每一组被试的每一对通道，先各自在时间维度上平均反馈环节对应的 WTC 时间序列和休息阶段（剔除头尾各 30s 以保留更稳定的数据）对应的 WTC 时间序列，然后将它们转换为 Fisher-z 数值。使用基于簇的置换检验方法，需要找到至少由两个相邻通道和至少两个相邻频点组成的频段-通道簇，在这样的簇上面反馈阶段的 WTC 大于休息阶段的 WTC。这是一种非参数统计方法，适用于分析多通道和多频点的神经数据，它相比于对单一通道或频点进行多重比较校正更可能保留一些受个体差异干扰的趋势性结果，进而提高统计检验的灵敏度（Maris & Oostenveld, 2007）。第一步，就 WTC 差值（反馈-休息）逐频点、逐通道地建立线性混合模型，它的固定效应是呈现方式（组块 vs. 假组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。第二步，从 34 个通道和 80 个频点（0.01~1Hz）中寻找反馈呈现方式效应显著，且数值上满足组块>假组块、组块＞单独且组块>休息的通道和频点。基于实验 1 的结果，组块化反馈条件下学生的迁移表现更好，预期背后的神经活动也呈现此趋势；故而在这

一步中关注上述方向性的结果。排除与呼吸相关的频点（0.15~0.30 Hz）和与心跳相关的频点（＞0.70 Hz）（Nozawa et al., 2016）。第三步，构建由至少两个相邻通道和至少两个相邻频点组成的簇，并将属于一个簇内的所有通道-频点的 F 值求和作为簇的统计量。第四步，随机置换数据，即学生的数据和另外一组的教师的数据组成虚假配对（Jiang et al., 2012; Long et al., 2021）。考虑到数据长度不同，将更长的数据剪裁至和较短的数据一样的长度（Reindl et al., 2018）。对随机置换后的数据进行 WTC 计算和第一步分析，并根据第三步中找到的簇，计算虚假的簇统计量，重复 1000 次。第五步，将真实的簇统计量与 1000 次置换计算后的虚假簇统计量分布（都转化为平方根，以使分布正态化）进行比较，并按如下公式计算对应的 p 值（Theiler et al., 1991）：$\mathrm{erfc}((\frac{|S_o-\mu_p|}{\sigma_p})/\sqrt{2})$，$S_o$表示真实的簇统计量，$\mu_p$和$\sigma_p$分别表示置换分布的平均数和标准差。第六步，基于上一步找到的显著的簇，计算每个簇上平均的 WTC 差值（反馈-休息），然后建立线性混合模型，它的固定效应是反馈呈现方式（组块 vs. 假组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别；频率-通道簇上的固定效应显著，再进行事后两两比较，若满足组块>假组块且组块>单独且 FDR 校正后 $p < 0.05$，认为频率-通道簇与组块反馈的加工有关。

脑间同步的确证 由于在上一步中使用了反馈环节与休息阶段的 WTC 差值进行计算，可能存在组块反馈环节的脑间同步比休息阶段小但计算结果显著的可能。考虑到人际互动相对于休息状态应该产生更大的脑间同步（Cui et al., 2012; Jiang et al., 2012），所以在组块反馈组中做后续的确证分析。第一步，就每个簇上平均的 WTC 数值建立线性混合模型，它的固定效应是任务（组块反馈 vs. 休息），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。第二步，将组块反馈时每个簇上平均的 WTC 数值与 1000 次随机置换计算后虚假 WTC 数值分布进行比较，并计算对应的 p 值。第三步，将每个簇上平均的 WTC 差值（组块反馈-休息）与 1000 次随机置换计算后虚假 WTC 差值（组块反馈-休息）进行比较，并计算对应的 p 值。若频率-通道簇同时满足第一步中的固定效应显著且第二步和第三步中的 $p < 0.05$，支持其上的脑间同步与真实的基于组块反馈的教学互动有关，而非来自相同的实验任务或环境。

3.5.3 行为-脑相关分析

然后，分析与组块反馈相关的师-生脑间同步与学习表现之间的关系。为了控制学习前知识基础的影响，在相关分析中使用相对正确率（学习后测验正确率-学习前测验正确率）

去量化学生的学习表现。基于皮尔逊相关分析，计算组块反馈过程中的师-生脑间同步与学生再认和迁移的正确率、与组块化错误修正之间的相关关系。

3.6 结果

3.6.1 接收反馈前学生的知识基础

就接收反馈前学生回答的正确率建立线性混合模型，固定效应是反馈呈现（组块 vs. 假组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。结果发现，反馈呈现的效应不显著（组块 vs. 假组块 vs. 单独，0.07 ± 0.08 vs. 0.07 ± 0.08 vs. 0.08 ± 0.10, $F(2, 36.58) = 0.10$, $p = 0.907$）。这表明，三组学生在接收反馈之前，知识基础较低且无差异。

3.6.2 基于反馈的师生互动促进了知识再认和迁移，且迁移长时保持

就学生在再认/迁移测验上的正确率分别建立线性混合模型，固定效应是测验时间（学习前 vs. 学习后即时 vs. 学习后 7 天）和反馈呈现（组块 vs. 假组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。并将迁移/再认测验上的正确率分别放入模型以控制其可能存在的效应。在这一步分析中，主要关注测验时间的效应。

在再认上，测验时间的效应显著（$F(2, 156.20) = 22.50$, $p < 0.001$, 图 6a）：相比于学习前的正确率（$M = 0.48$, $SD = 0.17$），学习后即时的正确率（$M = 0.91$, $SD = 0.13$, $t(185) = 6.43$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 0.22$, $SE = 0.03$）和学习后 7 天的正确率（$M = 0.81$, $SD = 0.20$, $t(183)= 4.92$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 0.15$, $SE = 0.03$）都显著提高；7 天后，正确率显著衰退（$t(139) = -2.94$, corrected $p = 0.011$, $\beta = -0.06$, $SE = 0.02$）。在迁移上，测验时间的效应显著（$F(2, 153.14) = 18.55$, $p < 0.001$, 图 6b）：相比于学习前的正确率（$M = 0.25$, $SD = 0.13$），学习后即时的正确率（$M = 0.71$, $SD = 0.23$, $t(185) = 5.34$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 0.21$, $SE = 0.04$）和学习后 7 天的正确率（$M = 0.64$, $SD = 0.25$, $t(177)= 5.84$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 0.20$, $SE = 0.03$）都显著提高；7 天后，正确率未显著衰退（$t(141) = -0.44$, corrected $p = 0.661$, $\beta = -0.01$, $SE = 0.03$）。

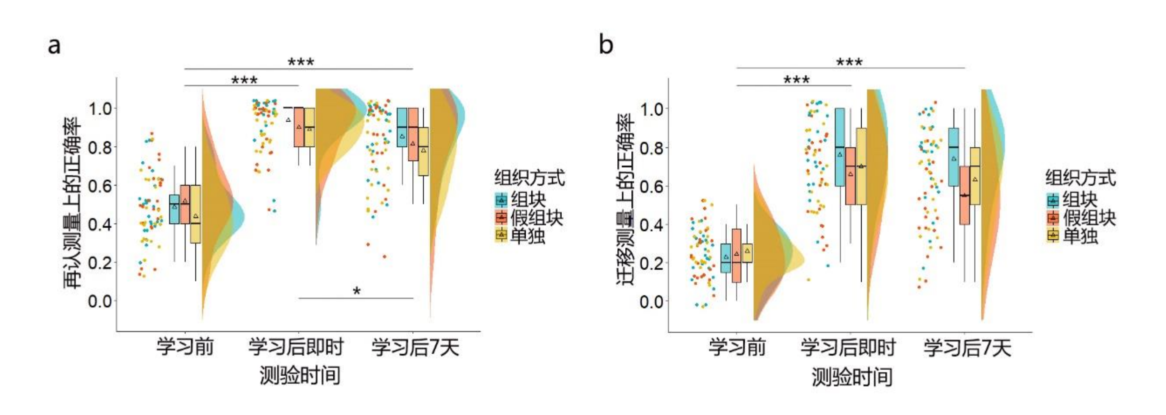


图 6 概念性知识水平

此外，在再认上，反馈呈现的主效应不显著（$F(2, 24.43) = 2.20, p = 0.132$），测试时间和反馈呈现的交互效应不显著（$F(4, 135.30) = 0.44, p = 0.778$）。在迁移上，反馈呈现的主效应不显著（$F(2, 27.43) = 1.74, p = 0.195$），交互效应边缘显著（$F(4, 130.73) = 2.22, p = 0.070$）。

3.6.3 相比于非组块呈现，组块化呈现反馈更有利于学生的长时迁移

为了控制个体在知识基础上的差异，并进一步探查反馈呈现方式在不同测试时间上对学习的不同影响，后续分析均就学习后概念性知识的增加（相对于前测的正确率增量）建立线性混合模型。首先，就学习后即时的再认正确率增量建立线性混合模型，固定效应是反馈呈现（组块 vs. 假组块 vs. 单独），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。并将即时的迁移正确率增量放入模型以控制其可能存在的效应。结果发现，反馈呈现的效应不显著（组块 vs. 假组块 vs. 单独，0.44 ± 0.19 vs. 0.38 ± 0.21 vs. 0.45 ± 0.16, $F(2, 38.57) = 0.74, p = 0.483$）。平行地，就学习后即时的迁移正确率增量建立线性混合模型，其他设置同前，放入即时的再认正确率增量以控制其可能存在的效应。结果发现，反馈呈现的效应边缘显著（0.53 ± 0.16 vs. 0.41 ± 0.20 vs. 0.44 ± 0.23, $F(2, 62.67) = 2.64, p = 0.079$）。

就学习后 7 天的再认正确率增量建立相应的线性混合模型。结果发现，反馈呈现的效应不显著（0.37 ± 0.21 vs. 0.30 ± 0.19 vs. 0.34 ± 0.21, $F(2, 30.95) = 0.20, p = 0.823$, 图 7a）。平行地，就学习后 7 天的迁移正确率增量建立相应的线性混合模型。结果发现，反馈呈现的效应显著（0.53 ± 0.17 vs. 0.30 ± 0.25 vs. 0.37 ± 0.22, $F(2, 61.70) = 6.11, p = 0.004$, 图 7b）：学生接收组块相比于单独反馈，学习后 7 天的迁移正确率增量显著更大（$t(29.9) = 2.49, p = 0.019$, corrected $p = 0.028, \beta = 0.15, SE = 0.06$），学生接收组块相比于假组块反馈，学习后 7 天的迁移正确率增量也显著更大（$t(32) = 3.20, p = 0.0031$, corrected $p = 0.009, \beta = 0.20, SE = 0.06$），但假组块与单独反馈无显著差异（$t(26.7) = -0.76, p = 0.455$, corrected $p = 0.455, \beta = -0.05, SE =$

0.06）。

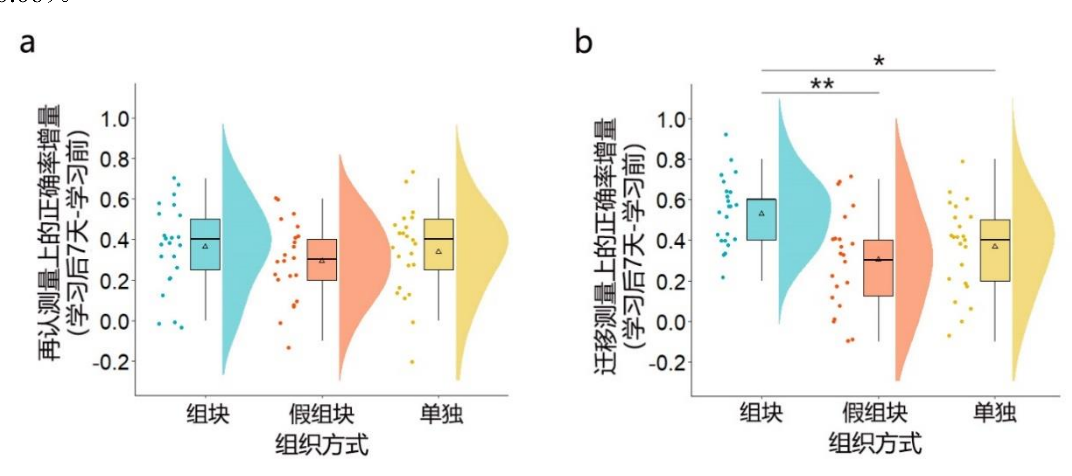


图 7 长时学习增益

3.6.4 反馈的呈现方式通过组块化错误修正影响低知识基础学生的长时迁移

进一步探究反馈的呈现方式影响低知识基础学生的长时迁移表现的可能认知过程，依次考察组块化错误修正和认知努力。考虑到假组块反馈组与单独反馈组在长时迁移表现上未见显著差异，后续将这两组合并成非组块反馈组，再与组块反馈组进行比较。据此，就学习后 7 天相比于学习前学生在迁移测量上的保持/转变的概念组数，建立线性混合模型，固定效应是保持/转变（错误→正确 vs 错误→错误 vs 正确→正确 vs. 正确→错误）和反馈呈现（组块 vs. 非组块）。随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别；并将学习前测量 2 上的正确或错误的概念组数作为初始水平、学习后 7 天再认测量上保持/转变的概念组数一起放入模型以控制他们可能存在的效应。结果如图 8a 所示，转变过程的效应显著（$F(3, 261.15) = 9.37$, $p < 0.001$）：错误→正确的概念组数（1.26 ± 0.26）比错误→错误的概念组数更多（0.78 ± 0.83, $t(197) = 3.71$, corrected $p = 0.002$, $\beta = 0.42$, $SE = 0.11$），其他比较均无显著差异（$ts < 2.16$, corrected $ps > 0.096$）。反馈呈现的效应不显著（$F(1, 249.65) = 0.36$, $p = 0.549$）。转变过程和呈现方式的交互效应显著（$F(3, 260.06) = 8.23$, $p < 0.001$）。简单效应分析发现，接收组块相比于非组块反馈的学生，错误→正确的概念组数更多（1.74 ± 1.05 vs. 1.02 ± 0.99, $t(214) = 4.13$, $p < 0.001$, $\beta = 0.69$, $SE = 0.17$），错误→错误的概念组数更少（0.48 ± 0.73 vs. 0.93 ± 0.84, $t(213) = -2.71$, $p = 0.007$, $\beta = -0.45$, $SE = 0.17$）。此外，接收组块反馈的学生，错误→正确的概念组数（1.74 ± 1.05），比正确→错误的概念组数更多（0.00 ± 0.00, $t(240) = 3.66$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 0.87$, $SE = 0.24$），比正确→正确的概念组数更多（0.22 ± 0.42, $t(241) = 3.16$, corrected $p = 0.004$, $\beta = 0.75$, $SE = 0.24$），也比错误→错误的概念组数更多（0.48 ± 0.73, $t(198) = 6.15$, corrected $p < 0.001$, $\beta = 1.19$, $SE = 0.19$）。其他比较均无显著差异（$ts <$

1.36, corrected $ps > 0.209$）。

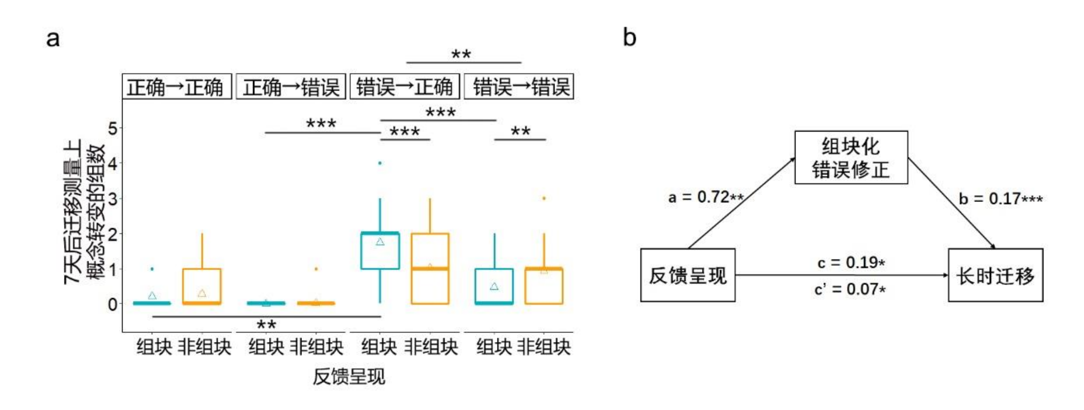


图 8 反馈呈现通过组块化错误修正影响低知识基础学生的长时迁移

此外，7 天后迁移测量上的学习增量与组块化错误修正呈正相关（$r = 0.81$, $R^2 = 65.61\%$, $p < 0.001$）、与组块化错误保持呈负相关（$r = -0.52$, $R^2 = 27.04\%$, $p < 0.001$）。继而考察 7 天后迁移测量上的组块化错误修正、保持在反馈呈现和 7 天后迁移的学习增量之间的中介作用，组块反馈组和非组块反馈组被分别编码为 1 和 0。结果发现，组块化错误修正的部分中介效应显著，$ab = 0.12$, bootstrap 95% $CI = [0.03, 0.21]$, $p = 0.008$; $c' = 0.07$, $p = 0.046$（图 8b）；组块化错误保持的部分中介效应显著，$ab = 0.06$, bootstrap 95% $CI = [0.01, 0.11]$, $p = 0.024$; $c' = 0.14$, $p = 0.009$。

接下来，就认知努力建立线性混合模型，固定效应是反馈呈现（组块 vs. 非组块），随机效应是老师的编号、性别和教学次数，以及学生的编号和性别。结果发现，相比于非组块反馈，接收组块反馈的学生报告出更高的认知努力（12.19 ± 4.84 vs. 10.58 ± 3.80, $F(1, 61.08) = 4.36$, $p = 0.041$）。此外，认知努力与认知负荷的受挫维度相关显著（$r = 0.32$, $R^2 = 10.24\%$, $p = 0.011$）且接收组块相比于非组块反馈的学生感知到更大的学习受挫（7.24 ± 4.53 vs. 5.45 ± 4.92, $F(1, 32.94) = 4.32$, $p = 0.045$）。但是，7 天后迁移学习增量与认知努力的相关未达显著（$r = -0.05$, $R^2 = 0.25\%$, $p = 0.700$）。故未继续考察认知努力的中介作用。

3.6.5 组块化反馈过程中，师-生在额、顶叶的脑间同步更强

考察在呈现组块相比于非组块化反馈（包括假组块和单独）过程中是否引发了显著更大的师-生脑间同步。发现了 3 个显著的频率-通道簇，其中 2 个位于额叶，1 个位于左侧顶叶。簇 1 包含通道 21 和 22，位置在右侧额上回和额中回，频率 0.019~0.028 Hz（图 9a）；簇统计量 = 5.16, 随机置换检验 $p < 0.001$（图 9b）。反馈时簇 1 的脑同步增加（反馈-休息，下同）的呈现方式效应显著（$F(2, 65) = 3.83$, $p = 0.027$, 图 9c）；两两比较发现，组块反馈时簇

1 的脑同步增加（0.07 ± 0.16）显著大于假组块反馈（-0.05 ± 0.16, $t(32.6) = 2.32$, $p = 0.027$, corrected $p = 0.045$, $\beta = 0.12$, $SE = 0.05$），也显著大于单独反馈（-0.05 ± 0.17，$t(31.1) = 2.28$, $p = 0.030$, corrected $p = 0.045$, $\beta = 0.12$, $SE = 0.05$），假组块反馈与单独反馈无差别（$t(27.1) = -0.04$, $p = 0.966$, corrected $p = 0.966$, $\beta = -0.00$, $SE = 0.05$）。后续分析确证，组块反馈时簇 1 的脑同步（0.40 ± 0.10）显著大于休息时的脑同步（0.33 ± 0.13, $F(1, 29.52) = 5.00$, $p = 0.033$, 图 9d）；组块反馈时簇 1 的脑同步显著大于随机配对下的虚假脑同步值（$p = 0.022$, 图 9e）；组块反馈时簇 1 的脑同步与休息时的脑同步增加显著大于随机配对下的虚假脑同步增加（$p = 0.032$, 图 9f）。

簇 2 包含通道 7、11、12 和 17，位置在左右两侧的额上回，频率 0.010~0.015 Hz（图 9g）；簇统计量 = 7.62，置换检验 $p < 0.001$（图 9h）。反馈时簇 2 的脑同步增加的呈现方式效应显著（$F(2, 62.51) = 8.05$, $p < 0.001$, 图 9i）；两两比较发现，组块反馈时簇 2 的脑同步增加（0.11 ± 0.14）显著大于假组块反馈（-0.07 ± 0.20, $t(31.5) = 2.79$, $p = 0.009$, corrected $p = 0.013$, β= 0.18, $SE = 0.06$），也显著大于单独反馈（-0.14 ± 0.28, $t(30.2) = 3.76$, $p < 0.001$, corrected $p = 0.002$, β= 0.24, $SE = 0.06$），假组块反馈与单独反馈无差别（$t(26.0) = 0.98$, $p = 0.337$, corrected $p = 0.337$, $\beta = 0.06$, $SE = 0.06$）。后续分析确证，组块反馈时簇 2 的脑同步（0.48 ± 0.12）显著大于休息时的脑同步（0.37 ± 0.12, $F(1, 22) = 15.47$, $p < 0.001$, 图 9j）；组块反馈时簇 2 的脑同步显著大于随机配对下的虚假脑通步值（$p = 0.008$, 图 9k）；组块反馈时簇 2 的脑同步与休息时的脑同步增加显著大于随机配对下的虚假脑同步增加（$p < 0.001$, 图 9l）。

簇 3 包含通道 25 和 28，位置在左侧顶下回，频率 0.027~0.034 Hz（图 9k），簇统计量 = 4.72，置换检验 $p < 0.001$（图 9l）。反馈时簇 3 的脑同步增加的呈现方式效应显著（$F(2, 36.43) = 6.29$, $p = 0.005$, 图 9m）；两两比较发现，组块反馈时簇 3 的脑同步增加（0.08 ± 0.11）显著大于假组块反馈（-0.03 ± 0.12, $t(36.5) = 2.88$, $p = 0.007$, corrected $p = 0.010$, β= 0.12, $SE = 0.04$），也显著大于单独反馈（-0.04 ± 0.13, $t(34.5) = 3.04$, $p = 0.005$, corrected $p = 0.010$, $\beta = 0.13$, $SE = 0.04$），假组块反馈与单独反馈无差别（$t(32.6) = 0.20$, $p = 0.842$, corrected $p = 0.842$, β= 0.01, $SE = 0.04$）。后续分析确证，组块反馈时簇 3 的脑同步（0.37 ± 0.08）显著大于休息时的脑同步（0.29 ± 0.10, $F(1, 22) = 12.87$, $p = 0.002$, 图 9p）；组块反馈时簇 3 的脑同步显著大于随机配对下的虚假脑同步值（$p = 0.006$, 图 9q）；组块反馈时簇 3 的脑同步与休息时的脑同步增加显著大于随机配对下的虚假脑同步增加（$p < 0.001$, 图 9r）。

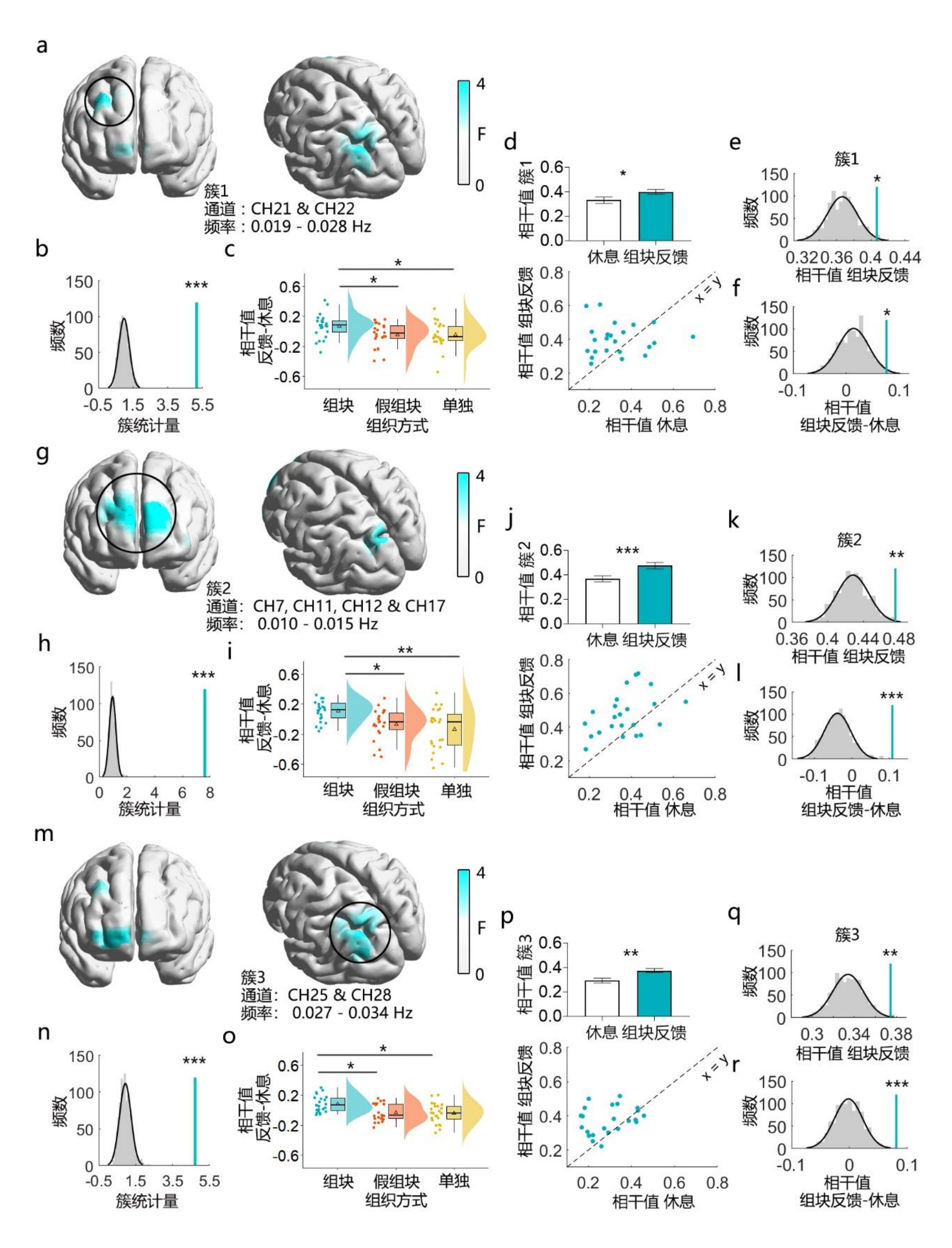


图 9 组块反馈时师-生在额、顶叶的脑间同步更强

3.6.6 组块化反馈过程中，师-生在额叶的脑间同步预测长时迁移和组块化错误修正

进一步，探究组块反馈过程中出现的师-生脑间同步能否预测学生的长时学习表现。结果发现，簇 1 上的脑同步差值（组块反馈-休息，下同）与学习后即时在再认测量上的正确率增量边缘正相关（$r = 0.37, R^2 = 13.69\%, p = 0.082$），与学习后 7 天在再认测量上的增量边

缘相关（$r = 0.38, R^2 = 14.44\%, p = 0.070$）；与学习后即时在迁移测量上的正确率增量显著正相关（$r = 0.64, R^2 = 40.96\%, p = 0.001$），也与学习后 7 天在迁移测量上的增量正相关（$r = 0.55, R^2 = 30.25\%, p = 0.006$, 图 10a）。其他簇上的脑同步与学习表现不相关（rs < 0.37, ps > 0.078）。

此外，将簇 1 上的脑同步与错误修正（错误→正确）、错误保持（错误→错误）的概念组数做相关分析，发现簇 1 上的脑同步差值与学习后即时的错误修正的概念组数正相关（$r = 0.69, R^2 = 47.61\%, p < 0.001$），与学习后即时的错误保持的概念组数不相关（$r = -0.14, R^2 = 1.96\%, p = 0.260$）；与学习后 7 天的错误修正的概念组数正相关（$r = 0.54, R^2 = 29.16\%, p = 0.007$, 图 10b），与学习后 7 天的错误保持的概念组数负相关边缘显著（$r = -0.24, R^2 = 5.76\%, p = 0.052$）。

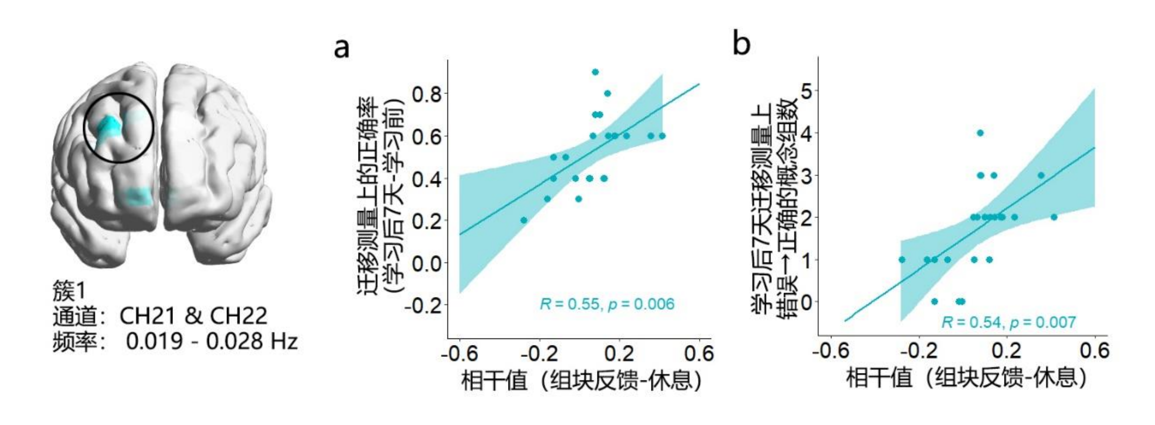


图 10 组块反馈过程中师-生在额叶的脑间同步预测长时迁移和组块化错误修正

3.7 讨论

实验 2 的结果表明，在师生互动中，将反馈中的信息按组块相比于非组块（包括单独和假组块）的方式呈现时，更有利于低知识基础学生的长时迁移表现。实验 2 在重复实验 1 结果的基础上，排除了两种可能的解释。首先，通过改变题目的顺序，排除了学生的长时迁移表现受学生对答案的简单记忆的干扰。其次，通过引入了假组块反馈组作为对照，并且发现假组块组与单独反馈组的长时迁移表现没有显著差别，说明单纯改变反馈的时间点并不能带来长时的迁移增益。上述结果支持了组块化呈现反馈在促进低知识基础学生长时迁移中的独特作用。此外，实验 2 发现组块化错误修正、保持在反馈呈现方式和长时迁移表现之间的部分中介作用显著，支持了有效错误修正在反馈促进长时知识迁移中的重要作用。虽然实验 2 发现相比于非组块反馈，接收组块反馈的学生报告出更大的认知努力和学习受挫，但并未发现认知努力与长时学习表现之间的关联。上述结果支持组块化反馈更能够明确地标识当前表

现与目标之间的差距，使得学生感受到了更大的学习受挫，并激发了认知努力，但也提示认知努力还不足以为学生带来长时的迁移增益。除此之外，实验 2 从人际角度揭示，组块化呈现的反馈引发了教师-学生二人组在额叶和顶叶更大的脑间同步，包括额上回、额中回和顶下回。这一结果表明，反馈中精细信息的组块化加工依赖于互动双方额叶和顶叶的同步性脑活动。进一步，实验 2 还发现组块化反馈引发的额叶师-生脑间同步可以预测学习者长时迁移表现及组块化错误修正。这提示了额叶上的师-生脑间同步可能是反馈的组块化呈现促进错误修正、提升学习迁移并长时保持的人际神经基础。

4 总讨论

4.1 师生互动中组块化反馈促进低知识基础学生的长时迁移

实验 1 在师生互动中比较了呈现方式不同的反馈，即组块反馈和单独反馈，发现了反馈呈现方式的长时效应：相比于单独的反馈，将反馈中的信息按组块化呈现时，更有利于学生的长时迁移；但仅对接收反馈前知识基础较低的学生有效应。为排除该结果的另一种可能解释——因为反馈延时导致组块反馈更有利于低知识基础学生的长时迁移，实验 2 中增加了一个假组块反馈（非组块但延时）条件。结果发现，组块反馈组的长时迁移表现显著好于另外两个非组块反馈组；而假组块反馈组和单独反馈组的长时学习表现并无差别，排除了反馈延时的可能解释。上述结果与前人研究发现一致，即发现通过强调学习内容之间的关联或将学习材料按组块化呈现可以促进知识习得并促进新情景问题解决和迁移（Cohen & Sekuler, 2010; Spiro et al., 1991）。值得注意的是，组块化反馈促进的是知识迁移而非再认，迁移促进是长时的而非即时的，且只发生在知识基础较低的学生身上。

首先，呈现方式不同的精细内容反馈只影响知识迁移而不包括再认。前人研究发现精细内容反馈相比于简单内容反馈可以同时促进知识再认和迁移（Finn et al., 2018）或只能促进知识迁移（Butler et al., 2013），这可能与所用测题的类型或难度有关。值得注意的是，在本研究中知识再认的结果呈现天花板情况，这可能反映了再认测量的难度较低，或使得这一维度的结果不呈现条件间差异。后续，可转变当前使用的联结再认为回想再认，从而提高再认的难度，继续考察反馈呈现方式对知识再认的影响。此外，再认测量上正确率达天花板且不存在条件间差异，可以在一定程度上排除，反馈呈现方式对知识迁移的影响并不由“无法再认”或“再认差别”所可能导致。

第二，长时效应的出现很可能是由于组块反馈促进了学生对概念性知识的认知加工深度，

从而减缓了随时间而来的迁移衰退。基于组块理论（Chunking Theory, Chase & Simon, 1973）和模板理论（Template Theory, Gobet & Simon, 1996），学习被认为是随着辨别网络的形成而发生，且该网络的发展会受到系统当前状态和环境输入的不断影响。理论上，组块化的环境输入有助于辨别网络发展出更高级别的结构。这种更高级别的网络结构很可能为长时记忆中的程序或语义信息附加了索引。在本研究中，组块化相对于分散化的反馈信息输入，更有助于低水平的学习者辨别存在关联的不同概念之间的异同点，促使辨别网络发展出高级结构。而由辨别网络的高级结构附加在长时记忆中的语义信息索引更不容易随时间消退，进而支持了先验知识水平较低的学习者对概念性知识的长时提取与应用，出现长时的迁移增益。

第三，组块化反馈的长时迁移效应仅出现在知识基础较低的学生身上，可由专长逆转效应（Expertise Reversal Effect, Kalyuga & Sweller, 2004）解释。对于缺乏相关知识背景的新手来说，新颖的任务很容易使工作记忆超负荷；因此，他们的表现更依赖于外部的支持性指导。相比之下，更具经验的学习者可以调用已有的图式帮助他们完成任务，而不容易出现工作记忆的超载，所以外部的指导对他们来说很可能是冗余的（Renkl & Atkinson, 2003; Sweller et al., 1998）。在本研究中，按组块化呈现的反馈作为一种支持性的外部指导，更有效地帮助了先验知识较低的学生处理反馈信息、修正错误并促进知识向新情境的迁移；但对于知识基础较高的学习者来说，反馈的组块化呈现可能是冗余的，故而无法使他们获得额外的学习增益。此外，实验 1 通过在问答反馈之前设置导入阶段的有无来操纵学生接收反馈前的知识基础水平的高低，后续发现不同知识基础的学生在知识再认、迁移表现上均并未呈现显著差异。这提示了导入阶段对于学生来说很可能是冗余性的教学支持，而无导入的问答反馈教学实则提高了概念性知识的学习效率，即在精简教学环节、缩短教学时间的同时，达到了同等的教学效果。但是值得注意的是，当前研究在导入阶段时将概念的术语和定义连续给学生讲述两遍，这一操作有可能对学生的知识基础提高过多，使得反馈呈现方式的可能影响无法显现。后续研究可以尝试在保证高知识基础操纵成功的前提下，使知识基础提高量相对于当前研究更少。例如，对导入阶段的操作进行修订，如将讲述遍数从 2 缩减为 1，或在导入与问答反馈阶段之间设置更长的时间间隔（如一天）。基于此，进一步探查反馈呈现方式对知识基础相对较高的学生的学习是否也会带来影响。

4.2 师生互动中反馈呈现方式通过组块化错误修正促进低知识基础学生的长时迁移

本研究发现，对于知识基础较低的学生，存在反馈的呈现方式通过整组概念的错误修正影响长时迁移的间接通路，提示了组块化错误修正的重要作用。这一结果符合认知学习理论

框架下，具体、有针对性或信息丰富反馈通过更有效地修正错误促进学习的说法（Kulhavy & Stock, 1989; Narciss & Huth, 2004; Bangert-Drowns et al., 1991），而且补充了在师生互动中通过呈现方式对反馈内容进行组织可以通过促进先验知识较低学生对概念性知识的有组织修正进而获得迁移的长时增益。结合组块理论和模板理论，组块化相对于分散化的反馈信息输入，很可能促进了低水平学习者更有效地明确或修正他们先前对概念性知识的不理解或错误理解，从而使辨别网络发展出高级结构。而由辨别网络的高级结构附加在长时记忆中的语义信息索引更不容易随时间消退，进而支持了低先验知识水平学习者在学习结束一段时间后仍能在新情境中对概念性知识进行有效提取与应用。

不同于实验 1 的结果，实验 2 还发现了相较于非组块反馈，学生接收组块反馈时报告出更大的认知努力和学习受挫。这可能是因为组块反馈更能够明确地标识当前表现与目标之间的差距，从而使学生感受到了学习受挫，并激发了认知努力。这一发现一定程度上符合基于元认知主义学习理论的观点，即认为只有当反馈有效地指示当前与目标表现之间的差距时，才可能促使学生自主地投入更多的认知努力去缩小差距（Nicol & McFarlane-Dick, 2006; Sadler, 1989）。然而本实验并未发现认知努力与长时的迁移表现之间的关联。这意味着反馈的呈现方式不能仅凭影响认知努力来实现学生长时的迁移增益。虽然本实验结果不支持认知努力是反馈呈现方式促进长时学习的认知过程，但仍有待更多的研究去对认知努力做更精准的测量（Laufer & Hulstijn, 2001; Golonka et al., 2015）并检验其可能作用。

4.3 师生互动中组块化反馈促进长时迁移的人际神经基础是额叶的师-生脑间同步

实验 2 基于近红外超扫描技术，探究了教师与学生互动过程中组块化反馈的人际神经基础，结果发现相较于非组块反馈，提供和接收组块化反馈的过程中，师、生在额、顶区域的大脑活动呈现更大的同步性，包括额上回、额中回和顶下回。这些脑区与前人研究发现的与反馈加工有关的脑区（ACC、DLPFC 和顶叶，Cavanagh et al., 2012; Crone et al., 2008; Luft et al., 2013; Mars et al., 2005; van Duijvenvoorde et al., 2008; Zanolie et al., 2008）以及与信息组块化加工有关的脑区（DLPFC 和后顶叶皮层，Alamia et al., 2016; Bor et al., 2003; Jin et al., 2020; Pammi et al., 2012）在空间上十分接近。此外，这些脑区也与前人研究发现的一般性或基于精细内容反馈的师生互动教学过程中脑间同步的发生位置接近（额叶或颞顶区域，Pan et al., 2020; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）。这提示了额、顶叶区域的脑间同步支持了师生互动中提供与接收反馈信息的加工过程，且对反馈信息的呈现方式变化敏感。

进一步，实验 2 发现与组块化反馈有关的额叶（而非顶叶）的师-生脑间同步与学习者

的长时迁移表现和错误修正存在正相关关系。上述结果提示了额叶上的师-生脑间同步可能是反馈的组块化呈现促进错误修正、提升学习迁移并长时保持的人际神经基础。前人研究发现，组块化语言信息的加工依赖于额叶（Jin et al., 2020; Grodzinsky & Santi, 2008）、额叶的活动与记忆的长时保持、延时的任务表现有关（Sakai & Passingham, 2003; Squire et al., 1993）且抽象的知识结构或图式与内侧前额叶的功能有关（Gilboa & Marlatte, 2017）。因此，本研究的结果支持了额叶在深层次的知识表征中发挥关键作用，可能支持辨别网络发展出更高级别、更抽象的知识结构，进而促进了知识迁移的长时增益。此外，前人研究发现额叶上的师-生脑间同步可以指示有效的教学策略，如支架式和高频互动式（Pan et al., 2018; 2020）；将反馈按组块化呈现也属于有效教学策略的一种，所以本研究的结果支持了额叶脑间同步在区分教学策略有效性上的作用。但是前人研究也指出，成年人更依赖顶叶皮层而不是 ACC 来处理更有效的反馈信息，以调整表现或纠正错误（Crone et al., 2008; van Duijvenvoorde et al., 2008; Zanolie et al., 2008）、在单独反馈过程中引发的师生顶叶上的脑间同步可以预测即时的学习迁移（Zhu et al., 2022）、颞顶联合区的师生脑间同步也与有无互动式的教学策略选择有关（Zheng et al., 2018）。据此，后续有待继续探究额、顶叶的师-生脑间同步在支持反馈加工、有效教学并促进即时和长时的深层学习中的不同作用与关系。

值得注意的是，师生在额叶上的脑间同步与组块化错误修正呈正相关关系，而组块化错误修正可以标识基于反馈的教学互动中学生的理解逐渐向教师的理解修正的过程，表明了师生在认知层面上的一致性增强。这一结果支持了脑间同步是互动双方在认知上对齐、实现交流与理解的神经基础（Shamay-Tsoory et al., 2019; Kelsen et al., 2022）。相比之下，单脑指标一般反映个体独立加工信息的过程；基于事件相关的单脑指标，依赖于简单、短时刺激的重复呈现，对揭示人脑加工内容复杂、连续长时、没有事先标定事件的自然化刺激的神经机制的效力有限（Hasson et al., 2004）。真实的课堂教学具有动态、连续且双向的信息交互特征，所以师生的脑间同步相比于单脑指标更能有效地反映教学过程中师生对学习内容的理解是否达成对齐，这是实现有效教学的基础（Tan et al., 2023）。此外，脑间同步除了指示认知是否达成齐性，还可以反映达成这种一致性的动态过程，如达成时间点、互动双方时间差模式等（Liu et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）。基于此，师生脑间同步可以为调整并优化课堂教学活动提供及时有效的客观证据，例如，持续较低的师生脑间同步可能提示学生在当前的知识理解上出现问题，所以无法与教师达成对知识的共同理解。

4.4 研究不足与展望

本研究另有几个问题值得注意。首先，反馈的元认知效应也是反馈影响学习的一个重要方面。已有研究表明，反馈不仅有助于纠正高置信度的错误答案（Butterfield & Metcalfe, 2001），还可以校准低置信度的正确答案的元认知错误（Butler et al., 2008）。所以，组块化的反馈也可能通过触发学习者对概念性知识更深层次的理解，进而更新或修正最初的元认知评估或错误。后续研究还可以测量学生对自己答案的正确性的置信程度，以考察反馈呈现方式的元认知效应。第二，社会因素在基于反馈的社会互动促进学习的影响中起着至关重要的作用，包括但不限于互动主体（例如教师与学生，学生与学生）和人际关系（例如信任，融洽）等。未来研究还可继续探究社会因素在其中的作用并揭示更广泛的社会互动中反馈的人际神经机制。第三，由于 fNIRS 的通道有限，采集的脑活动仅限于额叶和左顶叶区域，未详尽探查其他脑区的功能。考虑到基于反馈的教学互动中，互动双方的角色并不对等，后续研究可以继续考察教师和学生的不同脑区之间、带有时间差的人际神经同步。第四，与组块化反馈相关的师-生额、顶脑间同步的频率大致在 0.01 至 0.03Hz 之间。虽然这些脑间同步的频率范围与之前使用沟通范式（Jiang et al., 2012, 2015）和教学互动任务（Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）的 fNIRS 超扫描研究发现的脑间同步的频率存在重叠的区间，但脑间同步在频域上的功能意义还有待更多研究去探查。第五，在本研究中组块化的反馈方式同时带来了反馈延时。虽然这种带有延时性的反馈更能促进学习迁移，但前人研究也发现学习者在主观上仍会偏好更及时的反馈（Lefevre & Cox, 2017; Mullet et al., 2014）。相比于组块化反馈，学习者是否也会更偏好于及时的单独反馈，以及背后的认知神经机制有待后续继续研究。最后，尽管两个实验中都尝试纳入了不同性别的被试，并且存在异性的师生组合，但仍存在被试在性别和性别组合的数量上女性多于男性的问题；所以，在对研究结果做外部推论时需要谨慎考虑性别的影响。

5 结论

本研究通过两个双人实验（行为学、近红外超扫描），考察在真实的师生互动中，保持反馈信息不变，改变反馈的呈现方式对学习迁移的长时影响、认知过程和人际神经基础，得到如下结论：（1）组块化的反馈促进了低基础学生的长时迁移，并排除这种增益来自于反馈时间点的简单改变；（2）反馈的呈现方式通过组块化的错误修正影响长时的学习迁移；（3）提供与接收组块化反馈的过程中，师、生在额、顶叶出现更大的脑间同步；（4）组块反馈过程中，额叶的师-生脑间同步预测长时的学习迁移和组块化错误修正。

参考文献

Alamia, A., Solopchuk, O., D'Ausilio, A., Van Bever, V., Fadiga, L., Olivier, E., & Zénon, A. (2016). Disruption of Broca's area alters higher-order chunking processing during perceptual sequence learning. *Journal of cognitive neuroscience*, *28*(3), 402–417.

Anderson, D. I., Magill, R. A., & Sekiya, H. (2001). Motor learning as a function of KR schedule and characteristics of task-intrinsic feedback. *Journal of motor behavior*, *33*(1), 59–66.

Apps, M. A., Lesage, E., & Ramnani, N. (2015). Vicarious reinforcement learning signals when instructing others. *Journal of Neuroscience, 35*(7), 2904–2913.

Arbel, Y., Goforth, K., & Donchin, E. (2013). The good, the bad, or the useful? The examination of the relationship between the feedback-related negativity (FRN) and long-term learning outcomes. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25*(8), 1249–1260.

Bangert-Drowns, R. L., Kulik, C. C., Kulik, J. A., & Morgan, M. T. (1991). The instructional effect of feedback in test-like events. *Review of Educational Research, 61(2),* 218–238.

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 57*(1), 289–300.

Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Chaloner, K., Rowland, J., Ding, M., Poeppel, D., & Dikker, S. (2019). Brain-to-brain synchrony and learning outcomes vary by student–teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 31*(3), 401–411.

Bor, D., Duncan, J., Wiseman, R. J., & Owen, A. M. (2003). Encoding strategies dissociate prefrontal activity from working memory demand. *Neuron*, *37*(2), 361–367.

Butler, A. C., Godbole, N., & Marsh, E. J. (2013). Explanation feedback is better than correct answer feedback for promoting transfer of learning. *Journal of Educational Psychology, 105*(2), 290–298.

Butler, A. C., Karpicke, J. D., & Roediger, H. L., III. (2007). The effect of type and timing of feedback on learning from multiple-choice tests. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 13,* 273–281.

Butler, A. C., Karpicke, J. D., & Roediger III, H. L. (2008). Correcting a metacognitive error: feedback increases retention of low-confidence correct responses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *34*(4), 918–928.

Butterfield, B., & Metcalfe, J. (2001). Errors committed with high confidence are hypercorrected. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 27*(6), 1491–1494.

Cavanagh, J. F., Figueroa, C. M., Cohen, M. X., & Frank, M. J. (2012). Frontal theta reflects uncertainty and unexpectedness during exploration and exploitation. *Cerebral Cortex, 22*(11), 2575–2586.

Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology, 4*, 55–81.

Cheng, X., Li, X., & Hu, Y. (2015). Synchronous brain activity during cooperative exchange depends on gender of partner: A fNIRS-based hyperscanning study. *Human brain mapping*, *36*(6), 2039–2048.

Cohen, N. R., & Sekuler, R. (2010). Chunking and compound cueing of movement sequences: Learning, retention, and transfer. *Perceptual and motor skills*, *110*(3), 736–750.

Cooper, R. J., Selb, J., Gagnon, L., Phillip, D., Schytz, H. W., Iversen, H. K., Ashina, M., & Boas, D. A. (2012). A systematic comparison of motion artifact correction techniques for functional near-infrared spectroscopy. *Frontiers in Neuroscience, 6*, 147.

Cope, M., & Delpy, D. T. (1988). System for long-term measurement of cerebral blood and tissue oxygenation on newborn infants by near infrared transillumination. *Medical & Biological Engineering & Computing, 26*(3), 289–294.

Crone, E. A., Zanolie, K., Van Leijenhorst, L., Westenberg, P. M., & Rombouts, S. A. (2008). Neural mechanisms supporting flexible performance adjustment during development. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience, 8*(2), 165–177.

Cui, X., Bryant, D. M., & Reiss, A. L. (2012). NIRS-based hyperscanning reveals increased interpersonal coherence in superior frontal cortex during cooperation. *NeuroImage, 59*(3), 2430–2437.

Cui, X., Stetson, C., Montague, P. R., & Eagleman, D. M. (2009). Ready. go: Amplitude of the FMRI signal encodes expectation of cue arrival time. *PLoS Biology, 7*(8), e1000167.

Finn, B., Thomas, R., & Rawson, K. A. (2018). Learning more from feedback: Elaborating feedback with examples enhances concept learning. *Learning and Instruction, 54*, 104–113.

Fyfe, E. R., Rittle-Johnson, B., & DeCaro, M. S. (2012). The effects of feedback during exploratory mathematics problem solving: Prior knowledge matters. *Journal of Educational Psychology, 104,* 1094–1108.

Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1987). The cognitive basis of knowledge transfer. In *Transfer of learning* (pp. 9-46). Academic Press.

Gilboa, A., & Marlatte, H. (2017). Neurobiology of schemas and schema-mediated memory. *Trends in cognitive sciences*, *21*(8), 618–631.

Gobet, F., Lane, P. C., Croker, S., Cheng, P. C., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in cognitive sciences*, *5*(6), 236–243.

Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. *Cognitive psychology*, *31*(1), 1–40.

Golonka, E., Bowles, A., Silbert, N., Kramasz, D., Blake, C., & Buckwalter, T. (2015). The role of context and cognitive effort in vocabulary learning: A study of intermediate-level learners of Arabic. *The Modern Language Journal*, *99*(1), 19–39.

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics, 11*(5/6), 561–566.

Grodzinsky, Y., Santi, A. (2008). The battle for broca's region. *Trends in Cognitive Sciences, 12*, 474–480.

Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research, 77*(1), 81–112.

Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 50*(9), 904–908.

Hasson, U., Ghazanfar, A. A., Galantucci, B., Garrod, S., & Keysers, C. (2012). Brain-to-brain coupling: A mechanism for creating and sharing a social world. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(2), 114–121.

Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *science*, *303*(5664), 1634–1640.

Holper, L., Goldin, A. P., Shalóm, D. E., Battro, A. M., Wolf, M., & Sigman, M. (2013). The teaching and the learning brain: A cortical hemodynamic marker of teacher–student interactions in the Socratic dialog. *International Journal of Educational Research, 59*, 1–10.

Huppert, T. J., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2009). HomER: A review of time-series analysis methods for nearinfrared spectroscopy of the brain. *Applied Optics, 48*(10), D280–D298.

Jiang, J., Dai, B., Peng, D., Zhu, C., Liu, L., & Lu, C. (2012). Neural synchronization during face-to-face communication. *Journal of Neuroscience*, *32*(45), 16064–16069.

Jiang, J., Chen, C., Dai, B., Shi, G., Ding, G., Liu, L., & Lu, C. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(14), 4274–4279.

Jin, P., Lu, Y., & Ding, N. (2020). Low-frequency neural activity reflects rule-based chunking during speech listening. *Elife*, *9*, e55613.

Kalyuga, S., & Sweller, J. (2004). Measuring knowledge to optimize cognitive load factors during instruction. *Journal of educational psychology*, *96*(3), 558–568.

Kelsen, B. A., Sumich, A., Kasabov, N., Liang, S. H., & Wang, G. Y. (2022). What has social neuroscience learned

from hyperscanning studies of spoken communication? A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *132*, 1249–1262.

Krause, U. M., Stark, R., & Mandl, H. (2009). The effects of cooperative learning and feedback on e-learning in statistics. *Learning and instruction, 19*(2), 158–170.

Krijgsman, C., Mainhard, T., van Tartwijk, J., Borghouts, L., Vansteenkiste, M., Aelterman, N., & Haerens, L. (2019). Where to go and how to get there: Goal clarification, process feedback and students' need satisfaction and frustration from lesson to lesson. *Learning and Instruction*, *61*, 1–11.

Kulhavy, R. W., & Anderson, R. C. (1972). Delay-retention effect with multiple-choice tests. *Journal of Educational Psychology, 63*(5), 505–512.

Kulhavy, R. W., & Stock, W. A. (1989). Feedback in written instruction: The place of response certitude. *Educational Psychology Review, 1*(4), 279–308.

Laufer, B., & Hulstijn, J. (2001). Incidental vocabulary acquisition in a second language: The construct of task-induced involvement. *Applied linguistics*, *22*(1), 1–26.

Lefevre, D., & Cox, B. (2017). Delayed instructional feedback may be more effective, but is this contrary to learners' preferences?. *British Journal of Educational Technology*, *48*(6), 1357–1367.

Liu, J., Zhang, R., Geng, B., Zhang, T., Yuan, D., Otani, S., & Li, X. (2019). Interplay between prior knowledge and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. *NeuroImage, 193*, 93–102.

Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: the past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(3), 269–284.

Long, Y., Zheng, L., Zhao, H., Zhou, S., Zhai, Y., & Lu, C. (2021). Interpersonal neural synchronization during interpersonal touch underlies affiliative pair bonding between romantic couples. *Cerebral Cortex*, *31*(3), 1647–1659.

Luft, C. D. B., Nolte, G., & Bhattacharya, J. (2013). High-learners present larger mid-frontal theta power and connectivity in response to incorrect performance feedback. *The Journal of Neuroscience, 33*(5), 2029–2038.

Mars, R. B., Coles, M. G., Grol, M. J., Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Hulstijn, W., & Toni, I. (2005). Neural dynamics of error processing in medial frontal cortex. *NeuroImage, 28*(4), 1007–1013.

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods, 164*(1), 177–190.

Molavi, B., & Dumont, G. A. (2012). Wavelet-d motion artifact removal for functional near-infrared spectroscopy.

Physiological Measurement, 33(2), 259–270.

Mullet, H. G., Butler, A. C., Verdin, B., von Borries, R., & Marsh, E. J. (2014). Delaying feedback promotes transfer of knowledge despite student preferences to receive feedback immediately. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *3*(3), 222–229.

Narciss, S., & Huth, K. (2004). How to design informative tutoring feedback for multimedia learning. In H. M. Niegemann, D. Leutner, & R. Brunken (Ed.), *Instructional design for multimedia learning* (pp. 181–195). Munster, NY: Waxmann.

Nicol, D. J., & McFarlane-Dick, D. (2006). Formative assessment and self-regulated learning: A model and seven principles of good feedback practice. *Studies in Higher Education, 31*(2), 199–218.

Nguyen, M., Chang, A., Micciche, E., Meshulam, M., Nastase, S. A., & Hasson, U. (2022). Teacher–student neural coupling during teaching and learning. *Social cognitive and affective neuroscience*, *17*(4), 367-376.

Nozawa, T., Sasaki, Y., Sakaki, K., Yokoyama, R., & Kawashima, R. (2016). Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions. *NeuroImage, 133*, 484–497.

Pammi, V. C., Miyapuram, K. P., Samejima, K., Bapi, R. S., & Doya, K. (2012). Changing the structure of complex visuo-motor sequences selectively activates the fronto-parietal network. *Neuroimage*, *59*(2), 1180–1189.

Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Li, X., & Hu, Y. (2018). Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. *NeuroImage, 183*, 280–290.

Pan, Y., Dikker, S., Goldstein, P., Zhu, Y., Yang, C., & Hu, Y. (2020). Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. *NeuroImage, 211*, 116657.

Peters, S., Van der Meulen, M., Zanolie, K., & Crone, E. A. (2017). Predicting reading and mathematics from neural activity for feedback learning. *Developmental Psychology, 53*(1), 149–159.

Rawson, K. A., Thomas, R. C., & Jacoby, L. L. (2015). The power of examples: Illustrative examples enhance conceptual learning of declarative concepts. *Educational Psychology Review, 27*(3), 483–504.

Redcay, E., & Schilbach, L. (2019). Using second-person neuroscience to elucidate the mechanisms of social interaction. *Nature Reviews Neuroscience, 20*(8), 495–505.

Reindl, V., Gerloff, C., Scharke, W., & Konrad, K. (2018). Brain-to-brain synchrony in parent-child dyads and the relationship with emotion regulation revealed by fNIRS-based hyperscanning. *NeuroImage, 178*, 493–502.

Renkl, A., and Atkinson, R. K. (2003). Structuring the transition from example study to problem solving in cognitive skill acquisition: A cognitive load perspective. *Educational psychologist, 38*, 15–22

Sadler, D. R. (1989). Formative assessment and the design of instructional systems. *Instructional Science, 18*(2), 119–144.

Sakai, K., & Passingham, R. E. (2003). Prefrontal interactions reflect future task operations. *Nature neuroscience*, *6*(1), 75–81.

Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). Toward a second-person neuroscience. *Behavioral and Brain Sciences, 36*(4), 393–414.

Shamay-Tsoory, S. G., Saporta, N., Marton-Alper, I. Z., & Gvirts, H. Z. (2019). Herding brains: a core neural mechanism for social alignment. *Trends in cognitive sciences*, *23*(3), 174–186.

Singh, A. K., Okamoto, M., Dan, H., Jurcak, V., & Dan, I. (2005). Spatial registration of multichannel multi-subject fNIRS data to MNI space without MRI. *NeuroImage, 27*(4), 842–851.

Smith, J. D., Boomer, J., Zakrzewski, A. C., Roeder, J. L., Church, B. A., & Ashby, F. G. (2014). Deferred feedback sharply dissociates implicit and explicit category learning. *Psychological science*, *25*(2), 447–457.

Smith, T. A., & Kimball, D. R. (2010). Learning from feedback: Spacing and the delay-retention effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 36,* 80–95.

Song, S. H., & Keller, J. M. (2001). Effectiveness of motivationally adaptive computerassisted instruction on the dynamic aspects of motivation. *Educational Technology Research and Development, 49*(2), 5–22.

Spiro, R. J., Feltovich, P. J., Jacobson, M. J., & Coulson, R. L. (1991). Cognitive flexibility, constructivism, and hypertext: Random access instruction for advanced knowledge acquisition in ill-structured domains. *Educational Technology,* 24–33.

Squire, L. R., Knowlton, B., & Musen, G. (1993). The structure and organization of memory. *Annual review of psychology*, *44*(1), 453–495.

Sweller, J., Van Merrienboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, *10*(3), 251–296.

Tan, S. J., Wong, J. N., & Teo, W. P. (2023). Is Neuroimaging Ready for the Classroom? A Systematic Review of Hyperscanning Studies in Learning. *NeuroImage*, 120367.

Theiler, J., Galdrikian, B., Longtin, A., Eubank, S., & Farmer, J. D. (1991). Testing for nonlinearity in time series: The method of surrogate data (No. LA-UR-91-3343; CONF-9108181-1). Los Alamos National Lab.

van der Helden, J., Boksem, M. A., & Blom, J. H. (2010). The importance of failure: Feedback-related negativity predicts motor learning efficiency. *Cerebral Cortex, 20*(7), 1596–1603.

Van Duijvenvoorde, A. C., Zanolie, K., Rombouts, S. A., Raijmakers, M. E., & Crone, E. A. (2008). Evaluating the

negative or valuing the positive? Neural mechanisms supporting feedback-based learning across development. *Journal of Neuroscience*, *28*(38), 9495–9503.

Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage, 30*(4), 1414–1432.

Watanabe, K. (2013). Teaching as a dynamic phenomenon with interpersonal interactions. *Mind, Brain, and Education*, *7*(2), 91–100.

Yang, J., Zhang, H., Ni, J., De Dreu, C. K. W., & Ma, Y. (2020). Within-group synchronization in the prefrontal cortex associates with intergroup conflict. *Nature Neuroscience, 23*(6), 754–760.

Zanolie, K., Van Leijenhorst, L., Rombouts, S. A. R. B., & Crone, E. A. (2008). Separable neural mechanisms contribute to feedback processing in a rule-learning task. *Neuropsychologia, 46*(1), 117–126.

Zheng, L., Liu, W., Long, Y., Zhai, Y., Zhao, H., Bai, X., ... & Lu, C. (2020). Affiliative bonding between teachers and students through interpersonal synchronisation in brain activity. *Social cognitive and affective neuroscience*, *15*(1), 97–109.

Zimbardo, P. G., Johnson, R. L., & McCann, V. (2012). *Psychology: Core concepts* (7th ed.). Pearson.

Zhu, Y., Leong, V., Hou, Y., Zhang, D., Pan, Y., & Hu, Y. (2022). Instructor–learner neural synchronization during elaborated feedback predicts learning transfer. *Journal of Educational Psychology*, *114*(6), 1427–1441.

Chunking feedback in instructor-learner interaction facilities long-term learning transfer: behavioral and fNIRS hyperscanning studies

ZHU Yi[1], HU Yi[2]

([1]*Department of Psychology, Ningbo University, Ningbo 315211*)

([2]*The School of Psychology and Cognitive Science, East China Normal University, Shanghai* 200062)

Abstract

Feedback is a crucial driving factor for attitude and behavior change, as well as the acquisition of knowledge and skills. Previous research has shown that providing and receiving feedback with elaborated content in teacher-student interactions can deepen the comprehension of conceptual knowledge and promote knowledge transfer to new contexts. However, the impact of altering the presentation of feedback during interaction on long-term learning and its underlying neurocognitive processes remains unclear.

To address this question, the current study employed a naturalistic teacher-student dyadic question-answer feedback task. It conducted both a behavioral experiment and a fNIRS hyperscanning experiment to investigate the facilitative role of chunked feedback in long-term knowledge transfer, its cognitive processes, and the underlying neural basis during interpersonal interactions. In Experiment 1, students learned psychology concepts and received chunked (i.e., a set of two related concepts) or separate (i.e., one concept) feedback (i.e., correct answer and example) from the teacher. The prior knowledge levels were manipulated through a learning introduction phase. The between-subject design included feedback presentation (chunking vs. separate) × prior knowledge (high vs. low). Learning performance was measured after the task regarding knowledge recognition and transfer, with a second test conducted after 7 days to explore the long-term effect. Experiment 2 adopted fNIRS hyerscanning to simultaneously record teachers' and students' brain activity during interactions. Additionally, a pseudo-chunk (i.e., a set of two less-related concepts) feedback group was included to clarify potential confounding between feedback timing and format.

The results of Experiment 1 showed that in teacher-student interaction, presenting feedback in a chunked manner, compared to separate feedback, was more beneficial for the long-term transfer performance of students with lower prior knowledge. With the introduction of the pseudo-chunk feedback group as a control, Experiment 2 replicated this finding and revealed no significant

difference in long-term transfer performance between the pseudo-chunk and separate feedback groups. This indicates that merely changing the timing of feedback does not lead to long-term transfer gains for students with lower prior knowledge. Furthermore, it was found that chunked error correction partially mediated the relationship between feedback presentation format and long-term transfer performance. In Experiment 2, students receiving chunked feedback reported greater cognitive effort compared to those receiving non-chunked feedback, but no relationship was found between cognitive effort and learning. These results provide support for the possibility that the long-term transfer effect of chunked feedback for low-prior-knowledge students may be due to more organized error correction rather than cognitive effort. Additionally, Experiment 2 revealed that during the process of providing and receiving chunked feedback, greater brain-to-brain synchrony was observed in the frontal and parietal areas between teachers and students, with frontal brain-to-brain synchrony predicting long-term transfer performance and chunked error correction, suggesting it as the interpersonal neural basis of chunked feedback promoting effective error correction and facilitating long-term deep learning such as transfer.

This study provides practical insights for improving the effectiveness and efficiency of feedback in real classroom settings. Moreover, it suggests that interpersonal frontal brain synchronization may play a crucial role in organized information representation, effective knowledge correction, and long-term transfer during real instructional interactions, thereby contributing to a better understanding of the cognitive and neural basis of instruction and learning activities.

Keywords: feedback, chunking, long-term transfer, instructor-learner interaction, fNIRS hyperscanning, brain-to-brain synchrony

附录 1

术语	定义	举例
易得性启发	在判断某事件发生的可能性大小时，人们倾向于根据与该事件相关的具体事例进入脑海的容易程度来做出判断。	1. 小明和小王合作完成一项任务，他们分别付出了相同的时间和努力。在任务完成后，当他们需要决定谁该得到更多的奖励时，他们都认为自己的工作量更大，这是因为他们回忆自己之前所做的工作相对来说更容易。 2. 在一项研究中，人们被要求估计死于不同原因的人的百分比。虽然实际情况是有更多的人死于肺病，但人们会倾向于高估由谋杀、机动车事故和火灾造成的死亡人数，原因是后者更常出现在新闻报道中。
代表性启发	在判断某事物属于某类别的可能性大小时，人们倾向于根据该事物与该类别下的典型例子的相似程度来做出判断。	1. 如果什么东西看起来像鸭子，摇摇晃晃像鸭子，嘎嘎叫得像鸭子，那么它很可能就是鸭子。 2. 一枚硬币抛五次，人们往往会认为出现“正反正正反”的概率大于“正正正正反”。也就是说，如果你预期出现的序列是随机的，那么你会认为看起来更随机的序列出现的概率更大。
登门槛效应	人们在同意一个比较小的要求后，他们同意随后提出的比较大的要求的可能性会增加。	1. 当你有点忙的时候，你的朋友问你是否愿意陪她一起去附近的超市买个东西。你同意了。然而，一出门，她又问你是否能陪她一起去另外一个有点距离的商场。你虽然不情愿，但最后也很可能会答应。 2. 假设你在当地的动物保护所工作，你的目标是让更多的人来领养狗。为了达到这个目标，你可以先问一问人们是否愿意佩戴写有“领养代替购买”的徽章。过两周后，你可以再去问问这些人自己是否愿意领养狗。
门面效应	人们在拒绝一个比较离谱的大要求后，他们同意随后提出的比较合理的小要求的可能性会增加。	1. 小明收到来自大学校友会的电话，希望他缴纳 1000 元的会费来支持校友会的工作。当他抱歉地拒绝之后，来电者表示理解并询问他是否可以缴纳 500 元，如果不行，是否可以缴纳 100 元？最后小明同意缴纳 100 元。 2. 当我们想说服老师给我们额外的时间来完成学期论文时，可以先大胆地要求增加一周的时间，往往最后老师会答应多给两天的时间。

后视偏差	当某一事件已经发生，人们倾向于高估自己预见结果的能力。	1. 当明星情侣或夫妻在网络上宣布分手或离婚之后，总不免听到周围有人表示他们早就料想到了会是这样的结局。 2. 在每一次股市下跌之后，比如在互联网公司泡沫破裂之后，投资大师们纷纷表示，“市场显然早该有所调整了。”
反事实思维	当某一事件发生后，人们倾向于想象与实际相反的、可能发生但最终没有发生的结果。	1. 在奥运比赛刚刚结束，运动员接受奖牌时，银牌得主往往不及铜牌得主来得快乐。银牌得主在接受采访时，他们有时候会说：“我差点就能赢了，这太糟糕了。” 2. 小东在骑电动车回家的路上不小心发生了车祸，虽然他只是擦伤了手，但他后怕地想如果他当时没有戴头盔，受伤会严重地多。
去个体化	当人们处于群体当中时，对行为的规范限制就会放松，导致冲动和偏差行为的增加。	1. 在自己支持的球队输球后，现场观看比赛的球迷们往往会情绪激动，甚至有可能往场地中间扔矿泉水瓶发泄他们的不满。 2. 1967 年发生过这样一件事情：200 名俄克拉荷马的学生聚集在一起围观一个声称要从塔尖上跳下来的同学。下面的同学起劲地喊：“跳！跳！……”最后那个学生真的从塔尖上跳了下来，当场身亡。
社会促进	当他人在场时，个体完成简单任务的表现提高而完成复杂任务的表现受到阻碍。	1. 当老板希望员工做好简单的工作时，他们应该让员工当众完成。而当老板希望他的员工能完成一些具有挑战性的任务时，他应该给予员工一些独立的空间。 2. 小乔在邮局工作的第一周，如果有同事在他旁边分拣，他将信件放入分拣室的对应位置的速度会变慢，而且更容易出错。然而，过了一个月的时间，小乔已经熟练地掌握了这项任务，当同事在附近反而比他独自一人时完成得要更快。
基本归因错误	在对他人的行为做出原因解释时，人们倾向于高估这个人内在的因素如性格，而低估外在情境因素的影响。	1. 当我们向大学入学处的职员寻求帮助时，职员如果态度冷漠，我们便会认为他是个不友好的人，但其实我们忽略了这样一个事实，职员其实是因为之前接待了很多满腹牢骚的学生才变得态度冷漠。 2. 研究者在一项简单的问答游戏中，随机地将被试安排为提问者和回答者，提问者需要提出一些困难的问题，并要求回答者回答。结果发现，在这种情况下，回答者和其他旁观者都评价提问者是更聪慧的，但其实他们忽略了提问者的角色所赋予的优势。

自我服务偏差	在对自己的积极行为做出原因解释时，个体倾向于高估个人的内在因素，但在对自己的消极行为做出原因解释时，个体又倾向于高估外在的情境因素。	1. 学生将自己在考试中取得了好成绩归因于自己的努力与能力，而将考试失败归因于试卷的难度大或教师教学质量差。 2. 当发生交通事故时，驾驶员容易将原因归咎于天气和路况等因素；但当驾驶员惊险地避开可能发生的交通事故时，他们更倾向于认为是因为自己的警惕与机敏。
观察者效应		
曝光效应		

注：前 10 个概念用于教学。相邻两个概念构成一个组块。举例 1 和 2 分别用于反馈和迁移测量。额外提供了第 11、12 个概念在测验中构成 12 个备选项。

附录 2

认知负荷评价量表

该量表有 6 个维度，下表是各个维度含义的说明。请认真阅读各维度的详细说明后，根据自己所执行任务的实际情况，分别在代表 6 个维度的直线上相应的位置作标记。

维度名称	两端表示	维度说明
脑力需求	低/高	完成任务过程中需付出多大的脑力活动，如观察、记忆、思考、搜索等；该任务从脑力方面对你而言是容易还是困难，是简单还是复杂？
体力需求	低/高	完成任务过程中需付出多大的体力，如推、拉、转身，动作控制等；或该任务从体力方面对你而言是容易还是困难？肌肉感到松弛还是紧张？
时间需求	慢/快	你完成任务的节奏是缓慢的还是快速的,是感到从容不迫还是慌乱呢？
努力程度	小/大	完成该任务你付出的努力是小还是大？
业绩水平	好/差	对完成目标取得的成绩怎么样？对取得的成绩，你的满意程度有多大？
受挫程度	小/大	在完成任务过程中，你感到的沮丧感或烦恼程度是小还是大？

